

OTIMIZAÇÃO DE SEMÁFOROS DE TEMPOS FIXOS:  
REDES DE TRÁFEGO NÃO-SATURADAS MAS COM  
CAPACIDADE DEPENDENTE DAS FILAS DE VEÍCULOS

JOSÉ ANGELO BELLONI

Orientador:

Prof. Dr. BASILIO ERNESTO DE ALMEIDA MILANI

Dissertação apresentada no Instituto  
de Matemática, Estatística e Ciência  
da Computação, como requisito par-  
cial para obtenção do título de Mes-  
tre em Matemática Aplicada

- Setembro de 1983 -

1983

## AGRADECIMENTOS

Ao final deste trabalho gostaria de agradecer a todos que dele participaram, e em especial

- ao Prof. Dr. Basílio Ernesto de Almeida Milani pelo belo trabalho de orientação;
- ao Prof. Dr. Hermano Tavares por sua colaboração no início deste dissertação;
- ao Prof. Dr. José Mário Martinez por sua excepcional capacidade didática;
- ao Prof. Dr. Miguel Taube Netto por seu trabalho quando na Coordenação da Comissão de Pós-Graduação em Matemática Aplicada;
- ao Sr. João Baptista Esteves de Oliveira pelo trabalho de datilografia;
- ao Convênio CAPES-EBTU pelo suporte financeiro parcial fornecido a este trabalho;
- aos colegas da UNICAMP e da USP pelo estímulo de todas as horas.

## I N D I C E

1. INTRODUÇÃO . . . . .	1
1.1. Considerações gerais. . . . .	1
1.2. Objetivos e roteiro . . . . .	3
2. REDES DE TRÁFEGO COM SEMÁFOROS: ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS . . . . .	6
2.1. Fluxo de veículos . . . . .	6
2.2. Semáforos . . . . .	7
2.3. Relações de capacidade. . . . .	10
2.4. Atraso de veículos em intersecções sinalizadas. . . . .	18
3. O MODELO DE SIMULAÇÃO. . . . .	39
3.1. A rede de tráfego . . . . .	39
3.2. As equações dos elementos da rede . . . . .	41
3.3. A seqüencialidade no cálculo dos histogramas. . . . .	50
3.4. O índice de desempenho. . . . .	52
3.5. A influência das filas de veículos no índice de desempenho. . . . .	55
3.6. Tratamento da influência das filas de veículos. . . . .	57
4. O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO . . . . .	70
4.1. Determinação dos valores iniciais do tempo de verde efetivo e ciclo de cada semáforo. . . . .	70
4.2. A influência da fila de veículos nos valores iniciais de VE e C . . . . .	77
4.3. Determinação dos valores iniciais das defasagens. . . . .	82
4.4. Otimização de defasagens e tempos de verde. . . . .	82
4.5. Otimização do ciclo . . . . .	84
5. RESULTADOS NUMÉRICOS E CONCLUSÕES. . . . .	86
5.1. Rede nº 1 . . . . .	86
5.2. Rede nº 2 . . . . .	91
5.3. O esforço computacional . . . . .	101
5.4. Conclusão final . . . . .	103
BIBLIOGRAFIA. . . . .	106

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento dos centros urbanos das cidades médias e grandes e a larga utilização de veículos para transporte individual emprestam aos problemas de tráfego urbano uma importância econômica cada vez maior, justificando a aplicação de grandes investimentos na sua solução.

Uma das maneiras mais eficientes de atenuar problemas de trânsito a curto prazo é a otimização do controle de tráfego através de um sistema de semáforos coordenados.

Podemos classificar as redes de tráfego, quanto ao nível de utilização de sua capacidade de escoamento, em dois grandes grupos: saturadas e não-saturadas. Entendemos como saturadas aquelas redes de tráfego onde o fluxo de veículos supera a capacidade de escoamento fazendo com que a melhoria de seu desempenho implique, em geral, num remanejamento dos volumes de tráfego associado a uma ampliação da capacidade do sistema viário. Em redes de tráfego não-saturadas a experiência tem mostrado que a utilização de um sistema de semáforos coordenados por um relógio central, com duração das indicações otimizadas através de computadores, tem resultado em benefícios para o sistema viário que permitem recuperar rapidamente os investimentos feitos.

Vários métodos têm sido desenvolvidos e programas para computadores têm sido elaborados para melhorar ou otimizar políticas de semáforos de tempos fixos em redes de tráfego não-saturadas. Dentre estes destacam-se os seguintes: TRANSYT [15,6], SIGOP [12], GLC Combination Method [5] e MITROP [7]. Estes métodos são todos compostos por três partes principais que se interagem:

1. Um modelo matemático da rede de tráfego com semáforos. Duas hipóteses básicas para a sua aplicabilidade são:
  - Intersecções sinalizadas não-saturadas.
  - Os ramos da rede são suficientemente longos para acomodar as filas de veículos sem que estas afetem a capacidade das intersecções sinalizadas.
2. Um Índice de Desempenho, função da política de semáforos e relacionado com o número de paradas e o atraso dos veículos junto aos semáforos, com a rede de tráfego em regime permanente.
3. Um método de otimização.

Dentre os citados o método TRANSYT possui o modelo de tráfego mais preciso e acurado, que exige um grande esforço computacional e dificulta bastante o problema da otimização da política de semáforos. Os outros métodos citados utilizam modelos de simulação mais simples facilitando, assim, o problema da otimização da política de semáforos.

Inúmeros estudos comparativos mostram que, na prática, o método TRANSYT tem apresentado melhores resultados [9, 4, 1, 8]. Este sucesso se deve, em parte, ao fato de que um analista de tráfego experiente consegue estabelecer uma boa política de

semáforos inicial, atenuando os efeitos da precariedade do método de otimização e fazendo prevalecer a qualidade do modelo de tráfego.

O método TRANSYT foi objeto de vários estudos realizados pelo Grupo de Sistemas Urbanos e Regionais do Departamento de Engenharia Elétrica da FEC/UNICAMP [3,2,11,10]. alguns deles contratados pelo Metrô de São Paulo que na época estudava a coordenação de semáforos em algumas artérias daquela cidade. Desta experiência, entre outras conclusões, verificou-se que a hipótese básica de que os ramos da rede de tráfego são suficientemente longos para acomodar as filas de veículos sem que estas afetem a capacidade das intersecções sinalizadas, não é satisfeita em muitos casos práticos onde a melhoria da política de semáforos é necessária.

Em recentes estudos sobre redes de tráfego saturadas, Pignataro [14,13] fornece bons subsídios para modelar a influência do comprimento das filas de veículos na capacidade de intersecções sinalizadas antes que estas atinjam a saturação.

Este trabalho trata da melhoria da política de semáforos de tempos fixos, coordenados, em redes de tráfego não-saturadas. São consideradas redes de tráfegos com ramos de comprimento suficiente para acomodar as filas de veículos,mas aceitando que estas interfiram na capacidade das intersecções sinalizadas.

## 1.2. OBJETIVOS E ROTEIRO

Os objetivos principais deste trabalho são:

- utilizar as características de atuação dos semá-

foros e os resultados de Pignataro na construção de um modelo de tráfego eficiente, derivado do TRANSYT, para redes de tráfego não-saturadas, com intersecções sinalizadas cujas capacidades podem depender do comprimento das filas de veículos nos ramos da rede.

- estudar os problemas de cálculo envolvidos na simulação do modelo e no seu uso para a otimização ou melhoria da política de semáforos de redes de tráfego.

A distribuição dos assuntos ao longo dos capítulos que compõem este trabalho se faz da seguinte forma:

Capítulo 2 - Desenvolve os conceitos básicos de redes de tráfego envolvidos no modelo. São analisados e comparados os trabalhos de Webster sobre o atraso de veículos em intersecções sinalizadas isoladas e os de Robertson, Hillier e Rothery para intersecções não isoladas, os quais formam a base do modelo do método TRANSYT. É dada ênfase aos trabalhos de Pignataro sobre a influência do comprimento das filas de veículos na capacidade de intersecções sinalizadas.

CAPÍTULO 3 - Apresenta o modelo de tráfego e o índice de desempenho da rede na forma de equações de estado. A influência das filas de veículos nos componentes do índice de desempenho é analisada e é proposta uma forma de quantificar o efeito das filas de veículos sobre o fluxo de veículos saindo de intersecções imediatamente anteriores.

CAPÍTULO 4 - Trata da otimização da política de semáforos. É

utilizado um método do "tipo descida", proposto por Robertson [15] para o método TRANSYT, na busca de um valor mínimo para o índice de desempenho.

CAPÍTULO 5 - Apresenta alguns resultados numéricos obtidos através da aplicação dos modelos descritos nos Capítulos 3 e 4 a duas redes de tráfego. O tratamento da influência das filas de veículos é analisado e comparações com o método TRANSYT são feitas, permitindo-nos estabelecer algumas conclusões a respeito da utilidade do novo modelo.

## 2. REDES DE TRÁFEGO COM SEMÁFOROS: ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo conceituamos as variáveis de tráfego envolvidas no modelo de simulação a ser descrito no Capítulo 3. São comparados os trabalhos de Webster sobre o atraso de veículos em intersecções isoladas [17] com resultados de Robertson, Hillier e Rothery [15] para intersecções não isoladas.

Os estudos de Pignataro a respeito da influência das filas de veículos sobre veículos deixando intersecções anteriores [14,13] são discutidos e uma análise dos efeitos desta influência no índice de desempenho é apresentada.

### 2.1. FLUXO DE VEÍCULOS

O fluxo de veículos em um dado ponto de uma rede de tráfego é o número de veículos que passam por este ponto na unidade de tempo considerada. O fluxo de veículos será tratado como uma variável contínua a fim de simplificar os cálculos.

Para considerar a diferença no desempenho dos vários meios de locomoção, a contagem dos veículos é feita associando-se a cada tipo o seu equivalente em número de carros de passageiros.

A Tabela 2.1, obtida na referência [10], mostra a equivalência em carros de passageiros de alguns tipos de veículos. Tais dados se referem a veículos europeus e sua validade no

caso do Brasil deve ser discutida.

Tabela 2.1 - Equivalente em carros de passageiros de alguns tipos de veículos

Tipo de veículo	Equivalente em carros de passageiros
Veículos pesados e médios novos	1.75
Ônibus	2.25
Veículos leves novos	1.00
Motocicletas	0.33
Bicicletas	0.20

FONTE: Referência [10], pg. 13.

## 2.2. SEMÁFOROS

O modelo que vamos adotar determina um ciclo fundamental (C) para a rede de tráfego, e faz a opção automática para o ciclo de cada semáforo entre a forma C (ciclo fundamental da rede) e C/2 (metade daquele valor), de modo a permitir a cada semáforo uma forma de funcionamento mais próxima do que seria seu ótimo individual.

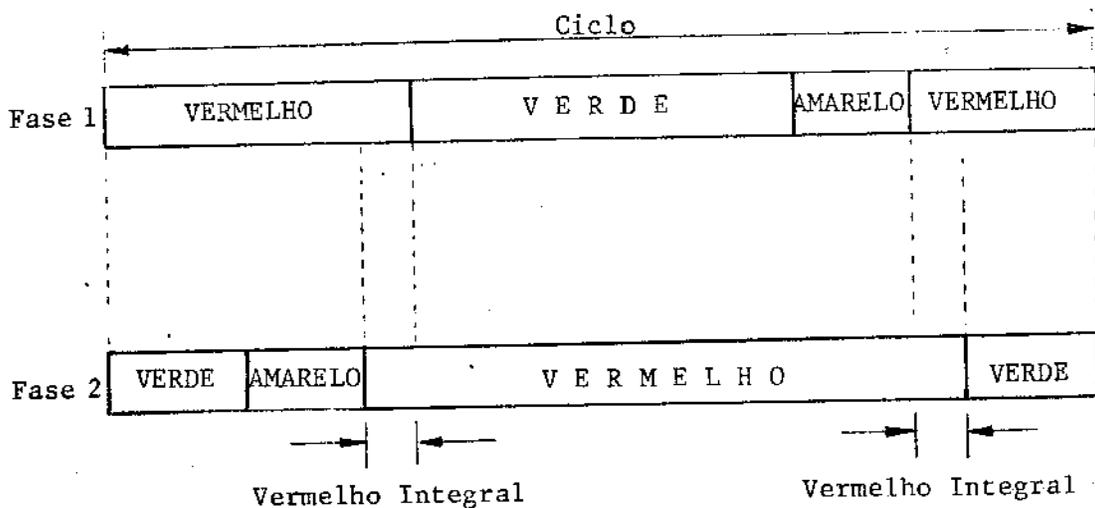


Figura 2.1 - Seqüência de indicações de um semáforo

Os semáforos são de duas fases com indicações de verde, vermelho e amarelo como mostra a Figura 2.1.

O sinal amarelo serve de aviso de mudança de indicação, sendo avistado após o verde e simultaneamente com o final do vermelho. Os tempos de vermelho integral servem para a passagem de pedestres e devem ser fixados a priori.

#### 2.2.1. CICLO

Ciclo é o intervalo de tempo necessário para uma seqüência completa de indicações: verde, amarelo e vermelho.

#### 2.2.2. FASE

Fase de um semáforo é uma seqüência completa de indicações (verde, amarelo, vermelho) aplicada simultaneamente a uma ou mais correntes de tráfego chegando à intersecção.

#### 2.2.3. SISTEMAS DE SEMÁFOROS COORDENADOS

Um sistema de semáforos coordenados é um conjunto de semáforos onde as mudanças de estado são sincronizadas por um relógio central.

#### 2.2.4. DEFASAGEM

Em um sistema de semáforos coordenados, entendemos por defasagem a diferença de posição entre semáforos.

Podemos, ainda, considerar os conceitos de defasagem absoluta e defasagem relativa:

— Defasagem Absoluta

Defasagem absoluta de um semáforo é o intervalo de tempo

decorrido entre o instante inicial e o instante da 1ª mudança de vermelho para verde (Figura 2.2).

- Defasagem relativa

Defasagem relativa entre dois semáforos é a diferença das defasagens absolutas destes semáforos.

Sejam

- $D_1$  - defasagem absoluta do semáforo 1,
- $D_2$  - defasagem absoluta do semáforo 2,
- $D_{12}$  - defasagem do semáforo 1 em relação ao semáforo 2.

Assim temos:

$$D_{12} = D_1 - D_2 \quad (2.1)$$

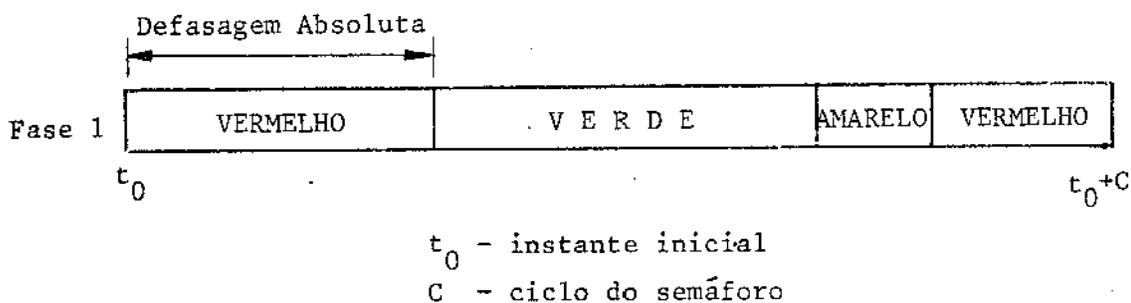


Figura 2.2 - Defasagem absoluta

### 2.2.5. VERMELHO INTEGRAL

Vermelho integral é o intervalo de tempo durante o qual ambas as fases do semáforo apresentam indicação de vermelho, permitindo aos pedestres uma travessia segura em intersecções com vias de mão de direção dupla.

## 2.3. RELAÇÕES DE CAPACIDADE

### 2.3.1. FLUXO DE SATURAÇÃO

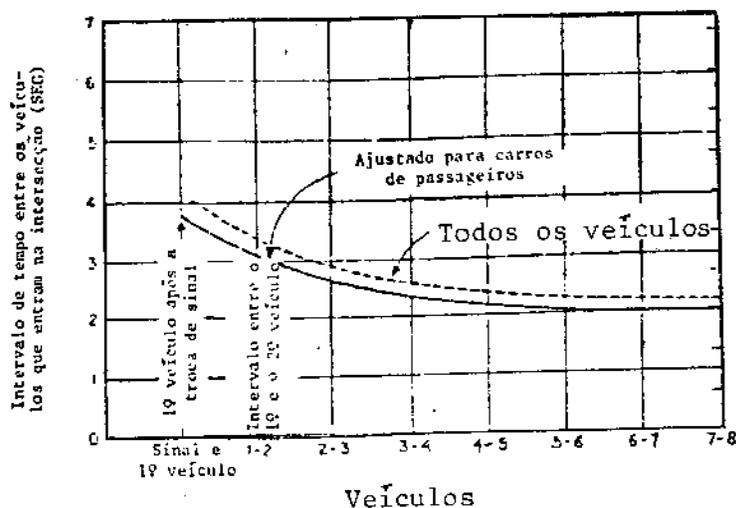
Fluxo de saturação, em uma via controlada por semáforo, é o fluxo (considerado constante) de descarga de veículos de uma fila, durante o tempo de verde da fase do semáforo que controla a via. O fluxo de saturação pode ser estimado através de fórmulas [17] ou medido no local, e é expresso, normalmente, em carros de passageiros por hora (Figura 2.6).

### 2.3.2. TEMPOS PERDIDOS

Quando um período de indicação de verde inicia, os veículos que se encontram parados junto à intersecção necessitam um certo intervalo de tempo para iniciarem o movimento e alcançarem uma certa velocidade. Passados alguns segundos a fila descarrega a uma taxa mais ou menos constante (fluxo de saturação). A este intervalo de tempo necessário para colocar a fila de veículos em movimento chamaremos Tempo Perdido no Início do Verde ou ainda Tempo Perdido na Saída.

No ano de 1944, Greenshields [18] realizou medidas a respeito do intervalo de tempo decorrido entre o início do período de indicação de verde de um semáforo e o instante em que os veículos parados junto a intersecção iniciam o movimento. Foram medidos não só o tempo para que o primeiro veículo na fila alcance a intersecção, bem como o intervalo de tempo decorrido entre a entrada na intersecção de dois veículos consecutivos. A Figura 2.3 bem como a Tabela 2.2 mostram alguns resultados de tais observações. Em 1960 Capelle e Pinnell [18]

realizaram medições semelhantes (Figura 2.4).



Fonte: Referência [18], pg. 428.

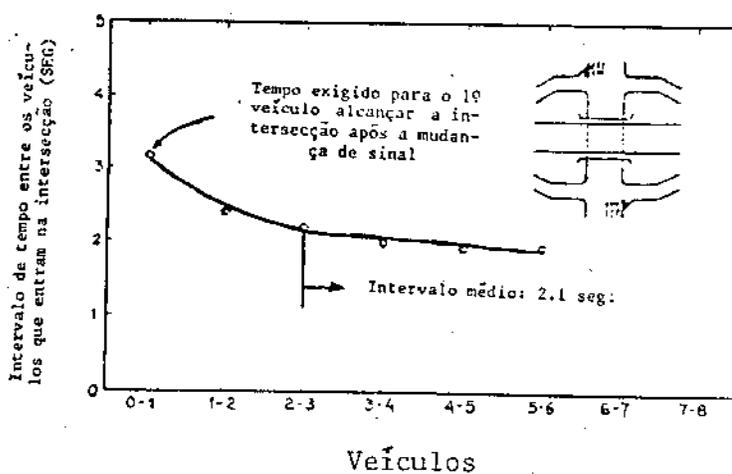
Figura 2.3 - Tempos perdidos no início do verde (Valores observados por Greenshields)

Tabela 2.2 - Valores observados por Greenshields para o tempo perdido no início do verde (USA-1944)

Posição na fila de veículos	Intervalo de tempo (segundos)	Tempo adicional exigido além do intervalo de tempo mínimo de 2.1 segundos
1º carro	3.8	1.7
2º carro	3.1	1.0
3º carro	2.7	0.6
4º carro	2.4	0.3
5º carro	2.2	0.1
6º carro	2.1	0.0
⋮	⋮	⋮
nº carro	2.1	0.0
<b>Total</b>	...	<b>3.7</b>

FONTE: Referência [18], pg. 429 e 450.

Comparando as Figuras 2.3 e 2.4 podemos observar que mesmo que os valores obtidos por Greenshields para os primeiros veículos na fila sejam maiores, o intervalo de tempo entre veículos converge, em ambos os estudos, a um mesmo valor (aproximadamente 2.1 segundos).



FONTE: Referência [18], pg. 428.

Figura 2.4 - Tempos perdidos no início do verde  
(Valores observados por Capelle e Pinnell)

Se no fim do período de indicação de verde ainda existir uma fila de veículos junto à intersecção, alguns veículos se utilizarão de parte do período de indicação de amarelo para cruzar a intersecção. Desta forma estamos assumindo que o período de amarelo pode ser usado pelos veículos, desde que estes desocupem a intersecção antes do início do período de vermelho. Em muitos casos nenhum veículo se utilizará do período de indicação de amarelo, mas desde que os motoristas tendem a usá-lo durante os períodos de pico, parece legítimo tratá-lo desta forma. Ao intervalo de tempo necessário para desocupar a intersecção chamamos Tempo Perdido no Fim do Amarelo, ou ainda Tempo Perdido na Chegada.

Consideramos, assim, tempo perdido pelos veículos junto a uma intersecção todo aquele período de indicação de verde ou amarelo que não é utilizado por estes veículos na travessia do cruzamento. A Figura 2.5 mostra um diagrama espaço x tempo ilustrando os tempos perdidos pelos veículos em uma intersecção controlada por semáforo durante um ciclo.

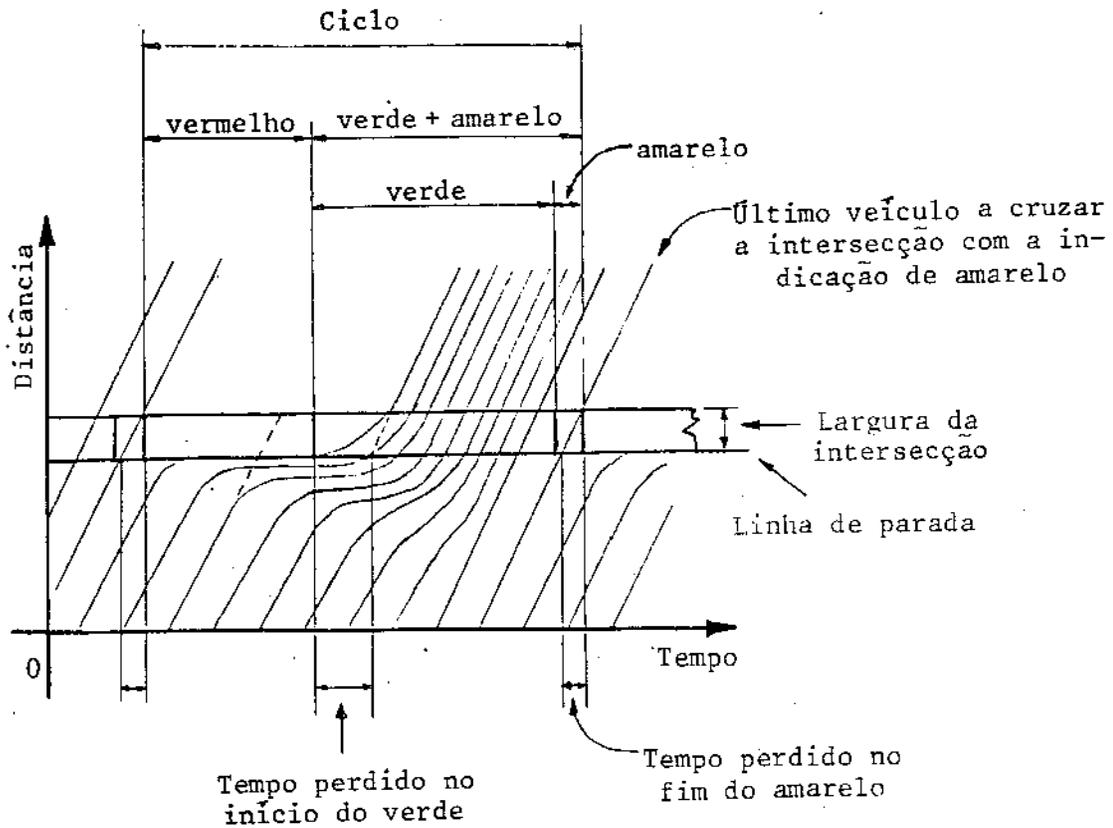


Figura 2.5 - Tempos perdidos pelos veículos junto a uma intersecção controlada por semáforo.

- TEMPO PERDIDO NO INÍCIO DO VERDE

É o tempo gasto para se colocar a fila de veículos em movimento, também chamado de "tempo perdido na saída" (TSA).

- TEMPO PERDIDO NO FIM DO AMARELO

É o tempo que leva o último veículo que cruza a intersecção durante o período de indicação de amarelo, para atravessar e desocupar a intersecção, também chamado de "tempo perdido na chegada" (TCH).

Observando-se novamente a Tabela 2.2, podemos assumir o tempo perdido no início do período de verde como aproximadamente 3.7 segundos por fase.

Considerar tais valores válidos para redes de tráfego brasileiras é altamente discutível, pois além de terem sido medidos nos USA, o foram no ano de 1944 e grandes alterações podem ter sido introduzidas devido ao avanço tecnológico na construção de veículos nas últimas décadas.

Por sua vez, o tempo perdido no fim do amarelo depende da velocidade dos veículos, da largura da intersecção e do comprimento dos veículos, e pode ser estimado através de fórmulas [2] ou, preferencialmente, obtidos através de medidas no local.

Os tempos perdidos pelos veículos junto às intersecções são muito importantes na determinação da capacidade de intersecções sinalizadas, desde que eles definem o número de veículos que podem cruzar a intersecção durante um certo período de indicação verde.

### 2.3.3. VERDE EFETIVO

Os períodos de verde e amarelo juntos podem ser substituídos por um período de "verde efetivo" e um período de "tempos perdidos" tais que o produto do verde efetivo pelo fluxo de saturação seja igual ao número de veículos descarregados por uma fila em um período de verde "real" saturado (isto é, um período de verde durante o qual a fila nunca desapareça) (Figura 2.6).

Este trabalho considerará, a partir deste ponto, o semáforo apenas com indicações de verde e vermelho, sendo a duração do período de verde igual ao verde efetivo da fase em questão.

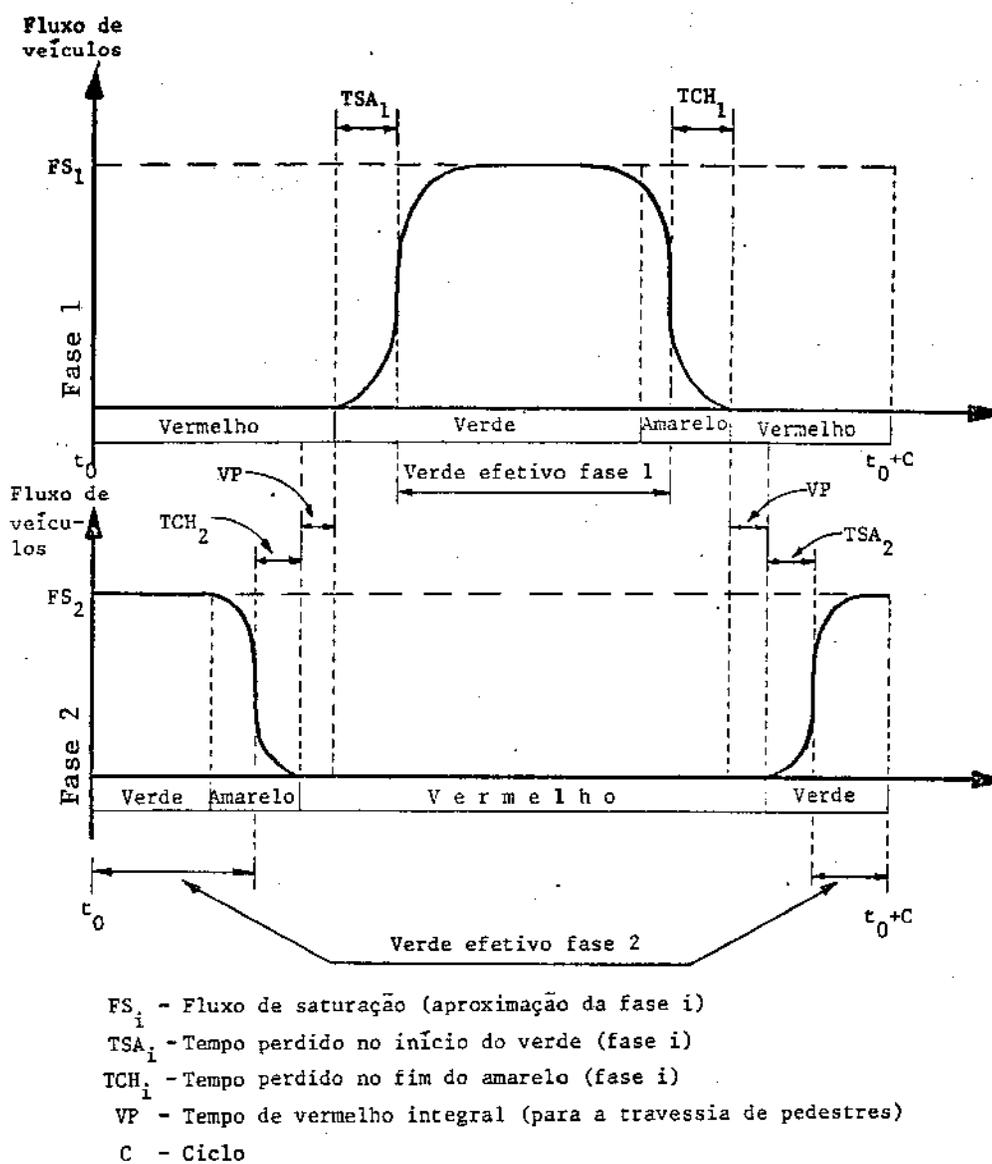


Figura 2.6 - Verde efetivo

### 2.3.4. GRAU DE OCUPAÇÃO DE UMA RUA COM SEMÁFORO

Grau de ocupação de uma rua é a razão entre o fluxo médio de veículos nesta rua pelo seu fluxo de saturação, e nos indica, em relação à unidade, o quanto da rua está sendo ocupada pelo fluxo de veículos.

Y - grau de ocupação da rua;

F - fluxo médio de veículos na rua durante um ciclo do semáforo;

FS - fluxo de saturação;

$$Y = \frac{F}{FS} \quad (2.2)$$

### 2.3.5. CAPACIDADE DE UMA RUA COM SEMÁFORO

Capacidade de uma rua é o produto do seu fluxo de saturação pelo tempo de verde efetivo da fase do semáforo que controla aquela rua.

CP - Capacidade da rua;

VE - Verde efetivo da fase do semáforo que controla a rua;

FS - fluxo de saturação da rua

$$CP = VE \cdot FS \quad (2.3)$$

### 2.3.6. GRAU DE SATURAÇÃO DE UMA RUA COM SEMÁFORO

Grau de saturação é a razão entre o número de veículos que passam pela rua durante um ciclo do semáforo e a capacidade da rua

X - Grau de saturação;

C - Ciclo do semáforo que controla a rua;

VE - verde efetivo da fase do semáforo que controla a rua;

F - Fluxo médio de veículos na rua;

$$X = \frac{F \cdot C}{FS \cdot VE} \quad (2.4)$$

### 2.3.7. VERDE MÍNIMO

Define-se como verde mínimo de uma fase de um semáforo o mínimo tempo de verde efetivo necessário para escoar o fluxo médio de veículos do ramo com maior grau de ocupação dentre os que chegam àquela fase daquele semáforo.

VMIN - verde mínimo;

Y - maior grau de ocupação dentre os ramos chegando a mesma fase do semáforo;

C - Ciclo;

$$VMIN = Y \cdot C = \frac{F}{FS} \cdot C \quad (2.5)$$

O grau de saturação de uma rua com semáforos alcança a unidade (caracterizando assim a saturação da rede) sempre que o verde efetivo da fase do semáforo que controla aquela rua for igual ao verde mínimo.

$$X = \frac{F \cdot C}{FS \cdot VE}$$

$$VE = VMIN \implies X = \frac{F \cdot C}{FS \cdot \frac{F}{FS} \cdot C} = 1.$$

Desta forma, para evitar a saturação, devemos exigir que o verde efetivo de cada fase de cada semáforo seja estritamente maior que o verde mínimo.

## 2.4. ATRASO DE VEÍCULOS EM INTERSECÇÕES SINALIZADAS

A fila de veículos junto a uma intersecção sinalizada atinge seu valor máximo ao final do período de indicação de vermelho e passa a diminuir com a passagem do estado da fase do semáforo para verde até desaparecer. O atraso do fluxo de veículos junto a esta intersecção é a soma dos tempos que cada veículo ficou parado na fila formada junto ao semáforo (Figura 2.7).

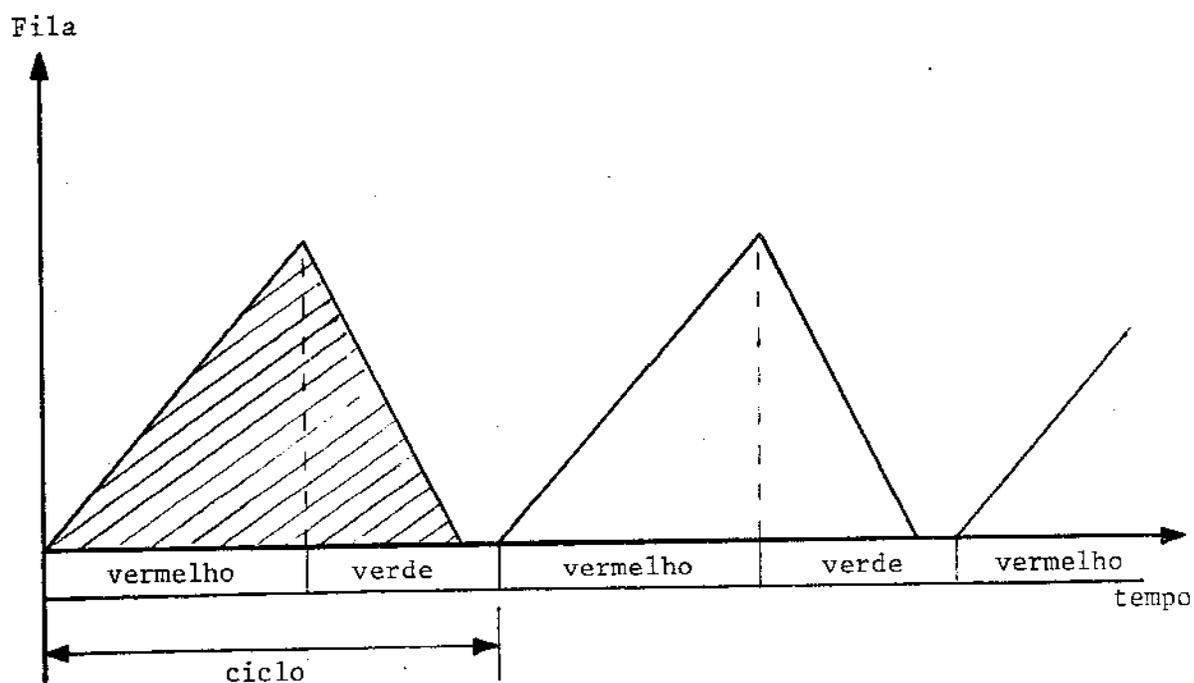


Figura 2.7 - Formação e destruição periódica das filas

A área hachurada da Figura 2.7 corresponde ao atraso sofrido pelos veículos junto ao semáforo.

### 2.4.1. INTERSECÇÕES ISOLADAS

É usual trabalhar-se com o atraso médio por veículo em

uma rua controlada por semáforo. Baseado em um trabalho de simulação e considerando a natureza aleatória do fluxo de veículos, Webster [17] desenvolveu uma fórmula que permite o cálculo do atraso médio por veículo em uma intersecção isolada:

AMV - Atraso médio por veículo;

C - Ciclo;

VE - Verde efetivo da fase que controla a rua;

X - Grau de saturação da rua;

F - Fluxo médio de veículos na rua;

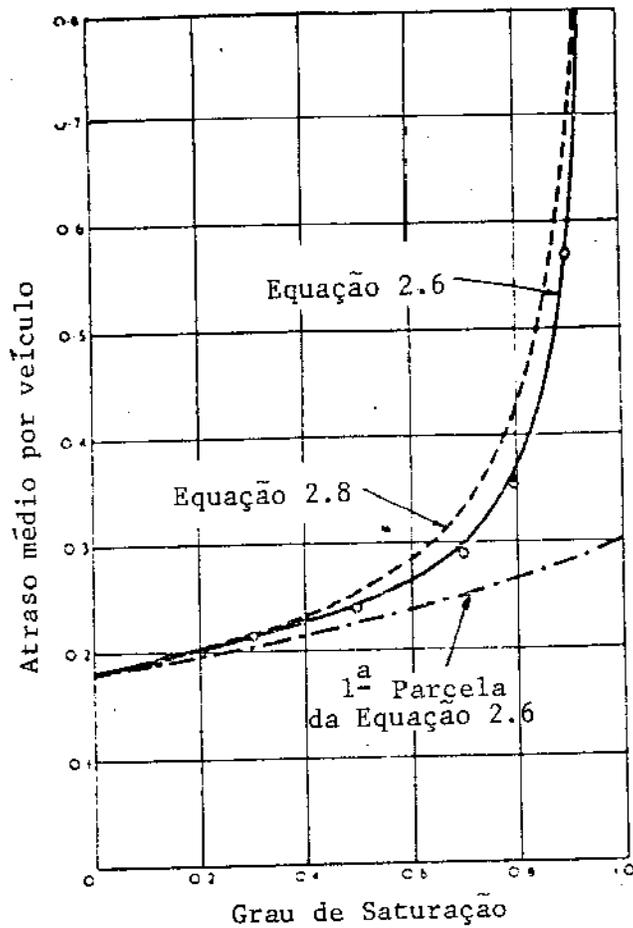
$$AMV = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2F(1-X)} - 0.65 \left( \frac{C}{F^2} \right)^{1/3} \cdot X^{(2+5\lambda)} \quad (2.6)$$

onde

$$\lambda = \frac{VE}{C} \quad (2.7)$$

Esta expressão do atraso médio por veículo não foi determinada de uma maneira puramente teórica. Os dois primeiros termos da expressão têm um significado teórico, mas o último termo é puramente empírico [17].

O primeiro termo da equação (2.6) é a expressão do atraso quando a chegada de veículos à intersecção se dá a uma taxa constante. Ainda que os valores do atraso calculados a partir deste primeiro termo tenham validade para baixos fluxos (Figura 2.8), a medida que estes aumentam precisamos considerar a natureza aleatória da chegada de veículos. O segundo termo da equação (2.6) considera esta natureza aleatória da chegada de veículos. Ele é a expressão do atraso sofrido por veículos chegando aleatoriamente ao cruzamento, formando fila e saindo a intervalos constantes. O termo empírico de correção (3º ter-



FONTE: Referência [17], pg. 5.

Figura 2.8 - Atraso médio por veículo numa intersecção isolada.

mo da equação (2.6)) empresta a equação uma adequação muito grande a realidade. Mas, desde que este termo representa de 5 a 15 por cento de AMV [17], para efeitos práticos permite-se tomar 9/10 do atraso médio obtido pela seguinte expressão:

$$AMV = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2F(1-X)} \quad (2.8)$$

#### 2.4.2. INTERSECÇÕES NÃO ISOLADAS

Os semáforos, pela sua maneira de atuar, atenuam consideravelmente a transferência de variações do fluxo de veículos na sua entrada para o fluxo de veículos na sua saída. Assim,

ao deixarem uma intersecção sinalizada, os veículos o fazem em grupos (pelotões) onde o intervalo de tempo entre um veículo e outro é mais uniforme do que seria se não houvesse o semáforo e, portanto, menos aleatório que o previsto no caso de intersecção isolada.

#### 2.4.2.1. DISPERSÃO DE PELOTÕES

Quando um pelotão de veículos deixa uma intersecção sinalizada, os veículos se deslocam com velocidades diferentes, devido ao comportamento de cada motorista e às condições de tráfego na rua, o que acarreta uma dispersão do pelotão.

Robertson [15] observou, em Londres, um total de 700 pelotões em 4 situações com características de tráfego distintas, tentando determinar o comportamento destes pelotões. Em cada uma destas situações foram colocados 4 observadores, um junto ao semáforo e os outros a, aproximadamente, 90, 180 e 300 metros de distância, para medir o tempo de passagem de cada veículo. Estas observações foram feitas em diferentes horas do dia a fim de obter uma grande variação nas condições de fluxo.

Da análise destas observações foi desenvolvido um método capaz de descrever o comportamento médio dos pelotões de veículos, a partir de um fluxo de entrada conhecido, e uma fórmula de recorrência foi estabelecida:

$K$  - Instante de tempo (discreto);

$T_M$  - tempo médio de percurso do ponto A até o ponto B;

$FD$  - fator de dispersão;

$F_A(K)$  - Fluxo médio de veículos no ponto A, no instante  $K$ ;

$F_B(K)$  - Fluxo médio de veículos no ponto B, no instante  $K$ ;

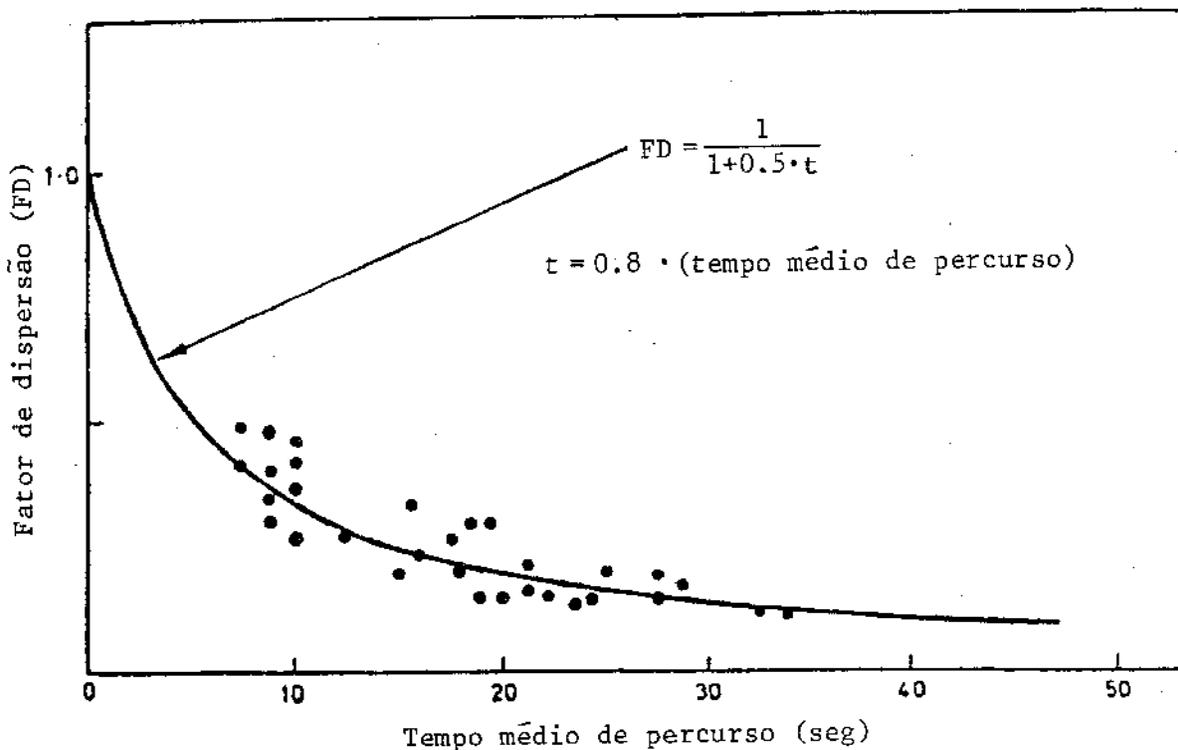
$$F_B(K+t) = FD \cdot F_A(K) + (1-FD) \cdot F_B(K+t-1) \quad (2.9)$$

onde

$$t = 0.8 \cdot TM \quad (2.10)$$

e o fator de dispersão FD é dado por:

$$FD = \frac{1}{1+0.5t} \quad (2.11)$$



FONTE: Referência [15], pg. 19.

Figura 2.9 - Fator de dispersão em função do tempo de percurso.

A Figura 2.9 mostra o ajuste entre os valores estimados pela equação (2.11) e os resultados observados. Nela os pontos representam o valor do fator de dispersão FD que minimizou o erro médio entre o comportamento observado do pelotão e o comportamento previsto para diferentes situações e diferentes condições de fluxo.

O processo de dispersão acima descrito se refere ao com-

portamento médio dos pelotões. Pelotões individuais apresentarão um comportamento aleatório variando em torno da média prevista.

O fator de dispersão FD depende unicamente do tempo de percurso entre os pontos considerados.

#### 2.4.2.2. A COMPONENTE ALEATÓRIA DO ATRASO

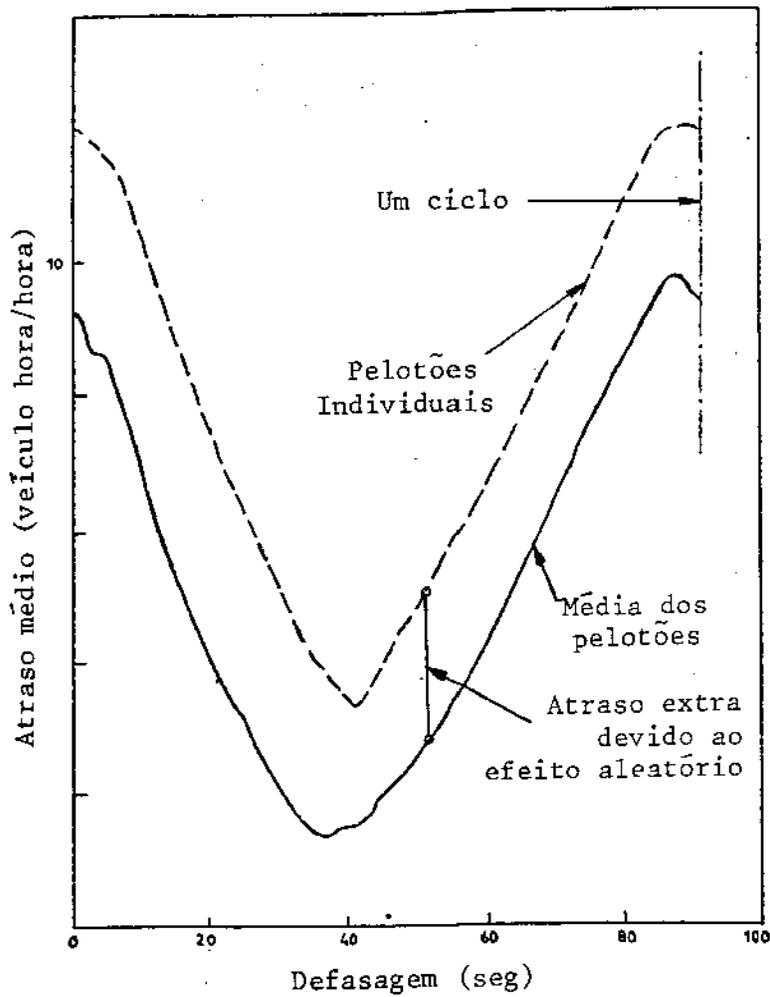
O volume de tráfego chegando a uma intersecção sinalizada flutua de ciclo para ciclo devido ao comportamento aleatório do fluxo de veículos. Assim, o fluxo de veículos chegando a um semáforo, possui uma média que varia com o tempo ao longo do ciclo, fazendo com que o atraso dos veículos dependa da defasagem entre os semáforos.

A variação aleatória sobre a média faz crescer o valor médio do comprimento das filas, o atraso e o número de paradas em relação aos valores baseados em fluxos constantes.

Usando o mesmo modelo de simulação utilizado por Webster (descrito na secção 2.4.1) e os resultados de Robertson sobre dispersão de pelotões, Hillier e Rothery [15] desenvolveram uma maneira de estimar o atraso de pelotões de veículos, calculando o atraso devido ao pelotão médio e adicionando um "atraso extra" que considera as flutuações aleatórias.

Os fluxos de veículos registrados por Robertson, na observação de pelotões a 300 metros de intersecções sinalizadas, foram utilizados para representarem veículos chegando a um conjunto imaginário de semáforos com os mesmos tempos de ciclo e verde que os semáforos reais. Nestas condições foram feitos dois tipos de cálculo do atraso médio nas intersecções imaginárias. No primeiro destes cálculos o fluxo de chegada de veículos foi considerado constante e no segundo foram utilizados

os fluxos observados por Robertson para calcular o atraso sobre sucessivos ciclos. Tais resultados foram comparados para determinar este "atraso extra" devido a natureza aleatória do fluxo de veículos.



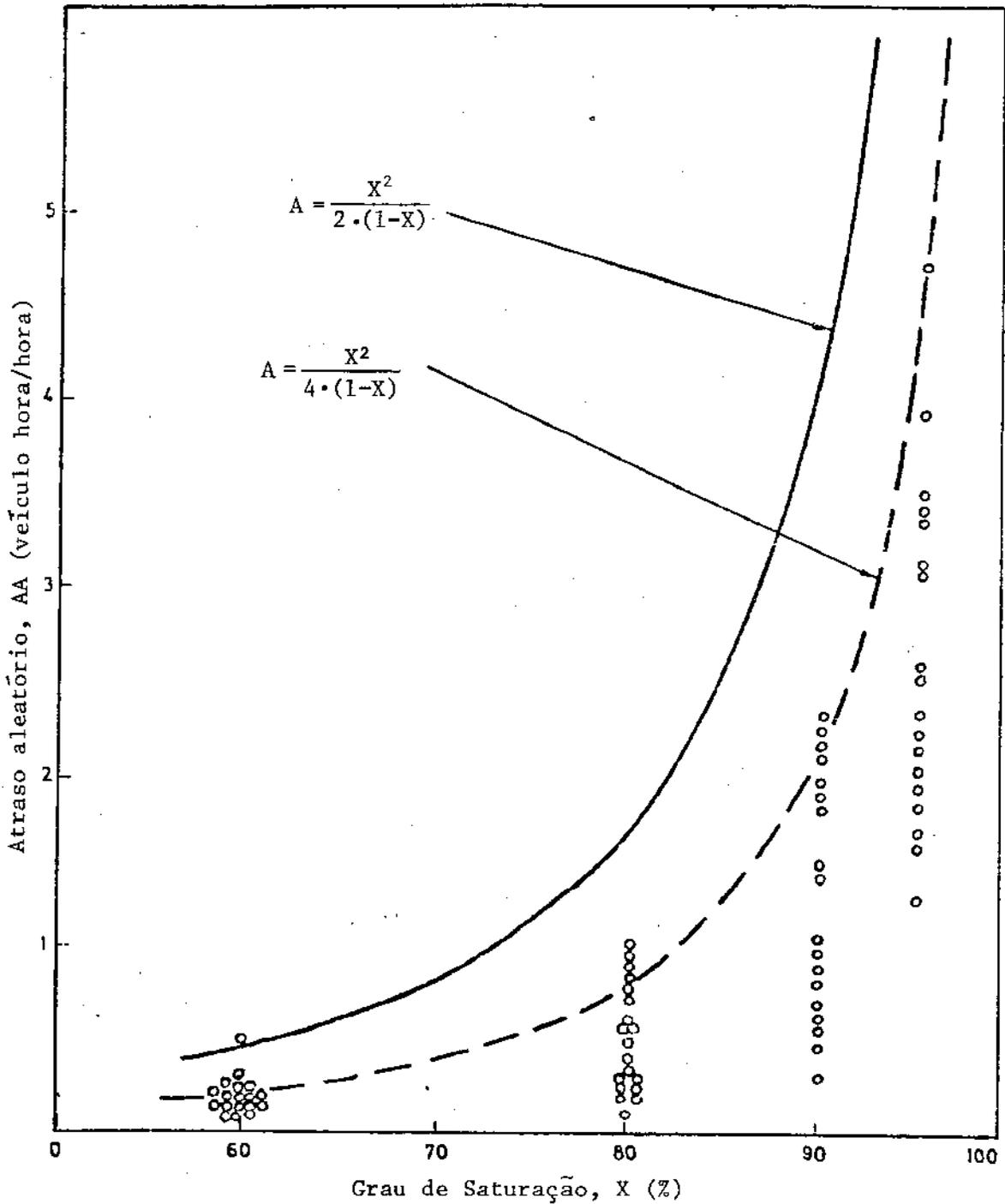
FONTE: Referência [15], pg. 22.

Figura 2.10 - Variação do atraso com a defasagem.

A Figura 2.10 mostra um exemplo de variação do atraso em função da defasagem, para pelotões individuais e a média dos pelotões.

Os resultados obtidos por Hillier e Rothery confirmaram que o "atraso extra" devido a natureza aleatória do fluxo de

veículos é função do grau de saturação das aproximações do sinal imaginário. Além disto, tais resultados indicaram grande dispersão, particularmente em situações com altos graus de sa-



FONTE: Referência [15], pg. 23.

Figura 2.11 - Variação do atraso aleatório com o grau de saturação

turação, como mostra a Figura 2.11.

A tendência geral dos resultados é similar à curva teórica do atraso sofrido por veículos chegando aleatoriamente a intersecção, que é dada pela expressão

$$A = \frac{X^2}{b \cdot (1-X)} \quad (2.12)$$

onde X é o grau de saturação da rua;

b é constante.

Esta mesma equação é usada por Webster para o atraso aleatório em uma intersecção isolada. A Figura 2.11 mostra, como era esperado, que o atraso aleatório em uma intersecção não-isolada é consideravelmente menor que em uma intersecção isolada.

Neste modelo a componente aleatória do atraso, chamada Atraso Aleatório, é função do grau de saturação e tem a seguinte expressão:

$$AA = \frac{X^2}{4 \cdot (1-X)} \quad (2.13)$$

Esta curva, que é mostrada na Figura 2.11, tende a "exagerar" o atraso aleatório para altos graus de saturação. Este caráter de penalidade do atraso aleatório impede o processo de otimização de estabelecer tempos de verde que impliquem em graus de saturação próximos da unidade.

#### 2.4.2.3. A INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS

É usual encontrarmos os termos "congestionado", "saturado" e "supersaturado" aplicados a uma mesma situação de trá-

fego, isto é, a uma situação em que um ou mais veículos não conseguem cruzar uma intersecção sinalizada até o final do tempo de indicação de verde. A fim de precisar o significado de tais termos, passamos a caracterizar certas situações de tráfego de veículos em função do mecanismo de formação das filas. Primeiramente dividimos as situações de tráfego de veículos em dois grandes grupos:

- Tráfego não-congestionado - caracteriza-se pela inexistência de filas. Ocasionalmente pequenas filas poderão se formar sem, porém, afetar o desempenho da intersecção.

- Tráfego congestionado - ocorre quando o fluxo de veículos excede a capacidade do sinal. Caracteriza tanto as situações nas quais a demanda excede a capacidade do sinal mas de forma pouco significativa, até aquelas onde a demanda é tão grande que o sistema de tráfego é seriamente afetado pela formação de longas filas.

Ainda assim não conseguimos uma maneira precisa de definir o problema. A situação que definimos como "tráfego congestionado" é, ainda, muito ampla e por isto é dividida em duas categorias:

- a primeira descreve uma situação de tráfego congestionado onde existe a formação de filas, mas o efeito destas sobre o atraso e o número de paradas dos veículos é local, isto é, o desempenho da rede de tráfego só é afetado no ramo onde a fila se desenvolve;

- a segunda caracteriza-se pela existência de fila, a qual cresce a ponto de afetar o desempenho da intersecção imediatamente anterior.

Considera-se que a intersecção imediatamente anterior foi afetada quando o seu desempenho é determinado não por suas próprias limitações físicas e operacionais, mas também pelo comportamento da intersecção posterior a partir da qual a fila se desenvolve.

Para determinar o efeito do crescimento da fila de veículos em uma intersecção sobre o volume de tráfego deixando uma intersecção imediatamente anterior, Pignataro e Lee [14] realizaram estudos e observações sobre os "tempos perdidos" pelos veículos junto a uma intersecção, o intervalo de tempo entre veículos (headway) e o tempo médio de percurso no ramo situado entre uma intersecção crítica e a intersecção imediatamente anterior.

Para medir as filas em intersecções críticas, o ramo entre as intersecções crítica e anterior é dividido em um número adequado de segmentos (Figura 2.12). Assim as possíveis filas são identificadas por  $n+1$  posições (os  $n$  segmentos em que

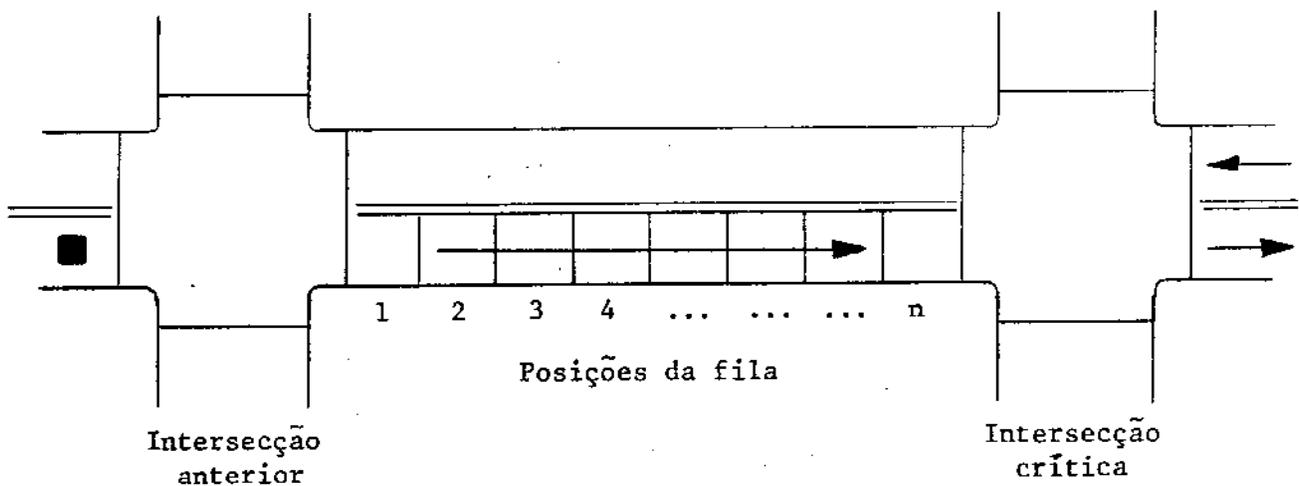
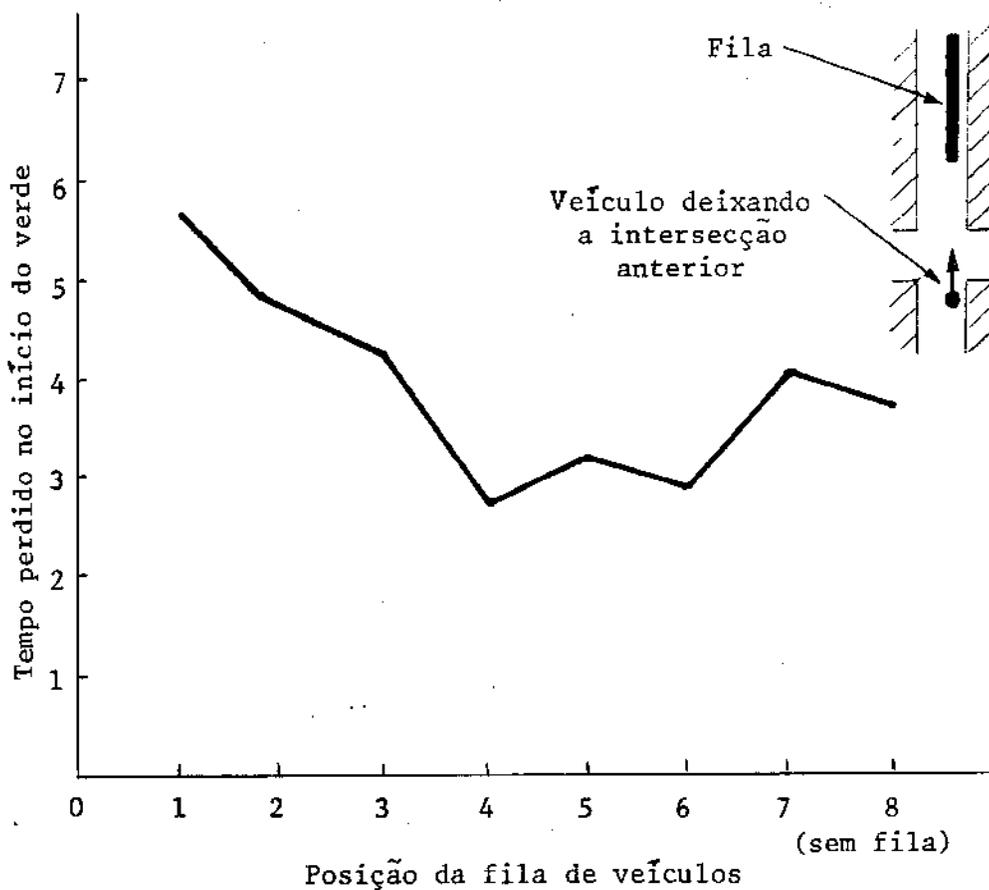


Figura 2.12 - Identificação da posição da fila

está dividido o ramo mais a posição de inexistência de fila).

### A INFLUÊNCIA DAS FILAS NOS TEMPOS PERDIDOS NO INÍCIO DO VERDE

Os tempos perdidos na saída pelos veículos que deixam a intersecção anterior (isto é, o intervalo de tempo entre o início do verde e o instante em que os veículos iniciam o movimento) são analisados na Figura 2.13 em relação às posições da fila na intersecção crítica, para determinar os efeitos das filas nos tempos perdidos na saída.



FONTE: Referência [16], pg. 256.

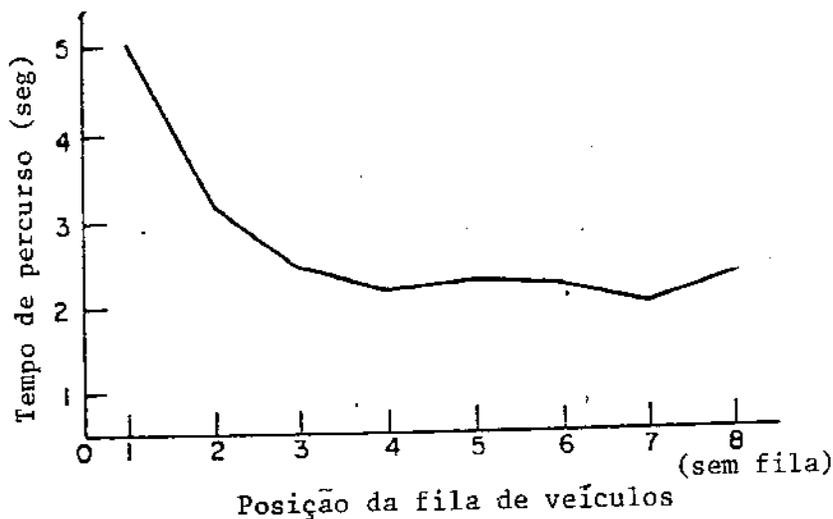
Figura 2.13 - Influência da fila sobre o tempo perdido na saída por veículos deixando a intersecção anterior.

Da figura podemos concluir que a medida que a fila cresce

e passa a alcançar posições críticas (posições 3,2,1), os tempos perdidos pelos veículos que deixam a intersecção anterior crescem sensivelmente.

#### A INFLUÊNCIA DAS FILAS NO TEMPO DE PERCURSO

O tempo gasto por um veículo que parte da linha de parada (faixa amarela) da intersecção imediatamente anterior, cruza esta intersecção, percorre o ramo e alcança a intersecção crítica, foi estudado por Pignataro sobre dois aspectos: veículos que estavam parados no início do verde da intersecção anterior e veículos que não param no início do verde da intersecção anterior.



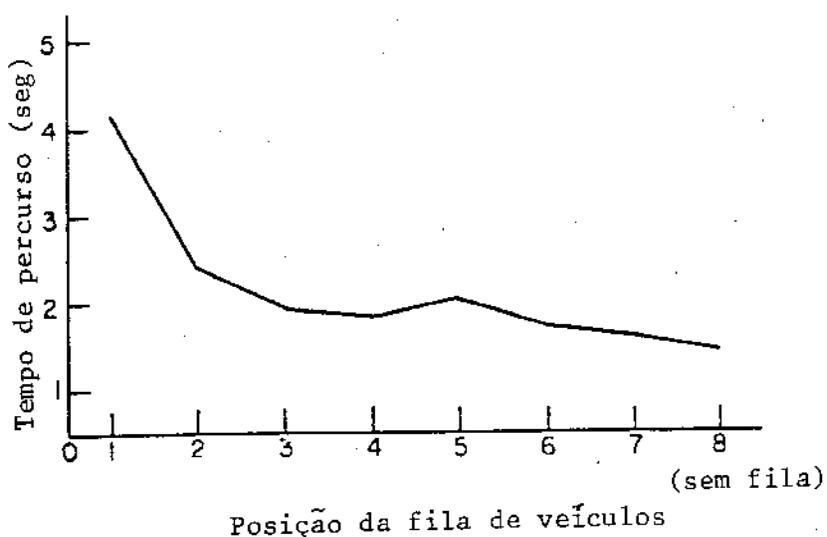
FONTE: Referência [16], pg. 258.

Figura 2.14 - Influência da fila sobre o tempo de percurso dos veículos que estavam parados no início do verde.

A Figura 2.14 mostra o tempo médio de percurso para veículos parados no início do verde da intersecção anterior, em função do comprimento da fila. Dela podemos deduzir que o tempo médio de percurso diminui com uma alta taxa quando a fila

diminui a partir da posição 1, e diminui com uma taxa bem menor a partir da posição 4.

Uma análise semelhante àquela feita para veículos parados no início do verde da intersecção anterior é feita para veículos que não param. A Figura 2.15 mostra que o tempo médio de percurso diminui quando a fila diminui, com uma alta taxa entre as posições 1 e 3 e com uma taxa bem menor da posição 3 em diante.



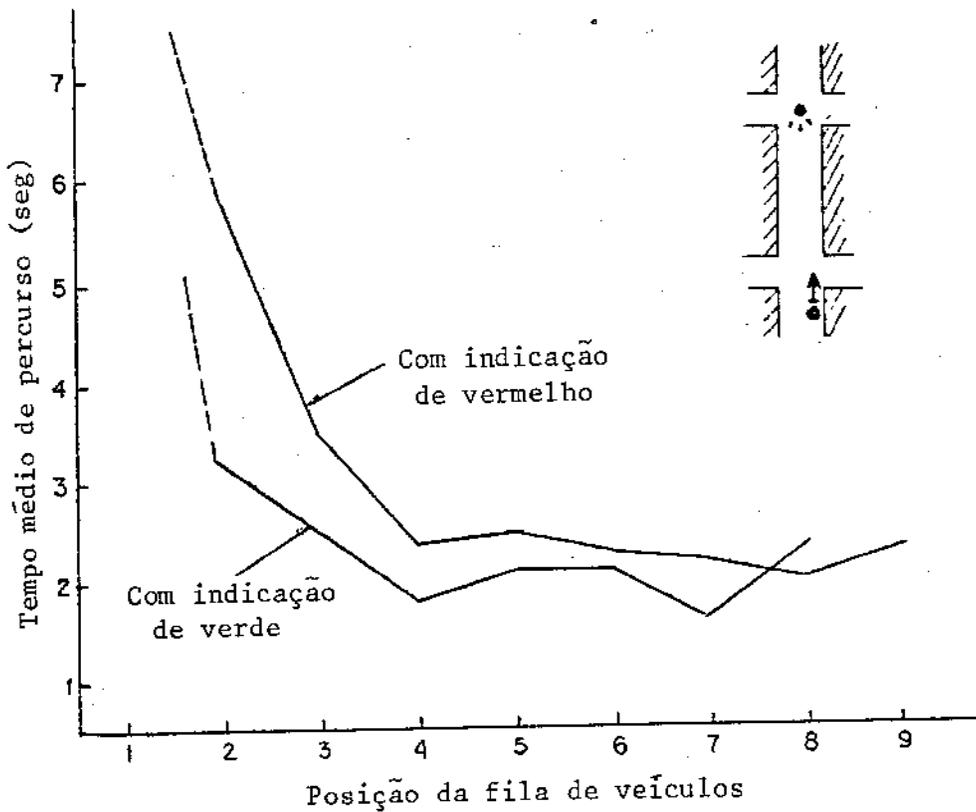
FONTE: Referência [16], pg. 258.

Figura 2.15 - Influência da fila sobre o tempo de percurso dos veículos que não param no início do verde

No caso dos veículos parados no início do verde da intersecção anterior a diminuição no tempo médio de percurso se dá a uma taxa bastante significativa, mesmo depois que o comprimento da fila diminui da posição 3. Isto pode ser uma indicação que as velocidades dos veículos que não param são muito grandes, e assim, muito mais sensíveis aos comprimentos das filas que as velocidades dos veículos que estavam parados.

As Figuras 2.14 e 2.15 indicam que tanto para veículos

parados no início do verde da intersecção anterior quanto para veículos que não param, existem significativos acréscimos no tempo médio de percurso quando o comprimento da fila é igual ou maior que a fila representada pela posição 4 (posições 1, 2, 3 e 4).



FONTE: Referência [16], pg. 264.

Figura 2.16 - Tempo médio de percurso em função da fila de veículos e da indicação do semáforo da intersecção crítica.

A Figura 2.16 mostra o efeito da defasagem entre as intersecções crítica e anterior, no tempo médio de percurso dos veículos que deixam a intersecção anterior. Nela o tempo médio de percurso dos veículos que deixam a intersecção anterior quando a indicação do semáforo da intersecção crítica é verde é comparado com o tempo médio de percurso dos veículos que

deixam a intersecção anterior quando a indicação do semáforo da intersecção crítica é vermelho, em função dos comprimentos de fila. A significativa diferença entre os dois tempos de percurso salienta a importância da defasagem na diminuição dos tempos médios de percurso.

Podemos observar na Figura 2.16 que os tempos de percurso dos veículos que "enxergam" uma indicação de vermelho no semáforo da intersecção crítica são maiores que os tempos de percurso dos veículos que "enxergam" uma indicação de verde. Poderia parecer que os primeiros estejam menos motivados para deixar a intersecção anterior imaginando que terão de parar junto à fila que se desenvolve a partir da intersecção crítica, enquanto que aqueles motoristas que "enxergam" a indicação de verde esperam que a fila já esteja em movimento quando eles a alcançarem.

#### A INFLUÊNCIA DAS FILAS NO INTERVALO DE TEMPO ENTRE VEÍCULOS

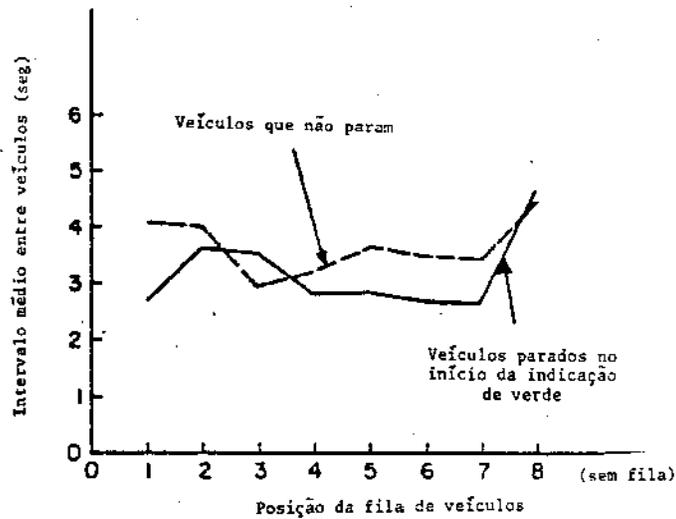
Pignataro analisou a distribuição do intervalo de tempo entre veículos deixando uma intersecção imediatamente anterior em relação ao comprimento da fila formada a partir da intersecção crítica, não encontrando nenhuma relação estatisticamente consistente, tanto para veículos parados no início do verde da intersecção anterior quanto para veículos que não pararam (Figura 2.17).

Dado que

$$\text{FLUXO DE SATURAÇÃO} = \frac{1}{\text{INTERVALO ENTRE VEÍCULOS (TEMPO)}}$$

a conclusão de que o intervalo de tempo entre veículos não é

afetado significativamente pela fila de veículos, implica que o fluxo de saída de uma intersecção (fluxo de saturação) permanece o mesmo independente do comprimento da fila formada a partir da intersecção crítica, a menos, é claro, que a fila cresça a ponto de bloquear a intersecção imediatamente anterior.



FONTE: Referência [16], pg. 269.

Figura 2.17 - Intervalos de tempo entre veículos em função da posição da fila de veículos.

Da análise destes resultados obtidos por Pignataro, podemos tirar algumas conclusões:

- o crescimento da fila junto a uma intersecção crítica, pode aumentar os tempos perdidos na saída pelos veículos que se encontram junto a intersecção imediatamente anterior;

- o tempo médio de percurso dos veículos que deixam a intersecção anterior também é significativamente afetado pelas filas junto à intersecção crítica;

- dado que o intervalo de tempo entre os veículos é a razão entre a distância entre eles e sua velocidade, e desde que o intervalo de tempo entre veículos não é afetado pelo compri-

mento das filas, podemos concluir que a distância entre veículos diminui quando a velocidade diminui. Isto implica que, quando a fila de veículos alcança um comprimento crítico, a velocidade e a distância entre veículos diminuem enquanto o fluxo de saída permanece o mesmo, resultando uma corrente de tráfego mais densa.

Portanto, ainda que qualitativamente o desempenho de uma intersecção anterior seja afetado, sua produtividade (no sentido de saída de veículos) não é reduzida pelas filas crescendo a partir da intersecção crítica, uma vez que o intervalo de tempo entre os veículos não é afetado, donde podemos concluir que o fluxo de saturação não se altera em função dos comprimentos de fila. É claro que estas considerações não se referem a filas que, a partir de uma intersecção crítica, causem bloqueio em uma intersecção anterior, pois neste caso a saída de veículos da intersecção anterior seria seriamente afetada.

#### 2.4.2.4. A VARIAÇÃO DO ATRASO EM FUNÇÃO DO ACRÉSCIMO NOS TEMPOS PERDIDOS DEVIDO À FILA DE VEÍCULOS

Como vimos na secção anterior, quando cresce a fila de veículos que se forma a partir de uma intersecção crítica, ela passa a afetar os tempos perdidos dos veículos junto a uma intersecção imediatamente anterior, ou seja, sempre que a fila na intersecção crítica ultrapassa um certo comprimento, o acréscimo nos tempos perdidos pelos veículos junto a uma intersecção imediatamente anterior faz com que estes disponham de um tempo de verde menor que aquele que o semáforo indica. Assim, para calcularmos o atraso dos veículos junto a um semáforo, devemos considerar os acréscimos nos tempos perdidos por

estes veículos devido a possíveis filas formadas a partir de intersecções posteriores.

A Tabela 2.3 mostra a variação do atraso uniforme AU (expressão (2.14)) e do atraso aleatório AA (expressão (2.15)) em função do tempo de verde em uma situação típica.

Tabela 2.3 - Variação do atraso de veículos em uma intersecção isolada como função do tempo de verde efetivo

Tempo de verde VE	Grau de saturação X	Atraso uniforme AU	Atraso aleatório AA	Atraso total AU + AA
72	0.50000	0.9999	0.1250	1.1249
70	0.51429	1.2345	0.1361	1.3706
68	0.52941	1.4937	0.1489	1.6426
66	0.54545	1.7778	0.1636	1.9414
64	0.56250	2.0865	0.1808	2.2673
62	0.58065	2.4198	0.2010	2.6208
60	0.60000	2.7777	0.2250	3.0027
58	0.62069	3.1605	0.2539	3.4144
56	0.64286	3.5679	0.2893	3.8572
54	0.66667	3.9999	0.3333	4.3332
52	0.69231	4.4568	0.3894	4.8462
50	0.72000	4.9383	0.4629	5.4012
48	0.75000	5.4444	0.5625	6.0069
46	0.78261	5.9754	0.7044	6.6898
44	0.81818	6.5310	0.9205	7.4515
42	0.85714	7.1112	1.2857	8.3969
40	0.90000	7.7160	2.0250	9.7410
38	0.94737	8.3457	4.2632	12.6089
36	1.00000	-	-	-

ciclo de semáforo: C = 90 seg.  
 fluxo médio no ramo: F = 1.200 veíc./hora  
 fluxo de saturação: FS = 3.000 veíc./hora

$$AU = \frac{C \cdot F \cdot (1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} \quad (2.14)$$

$$AA = \frac{X^2}{4(1-X)} \quad (2.15)$$

onde

$$X = \frac{F \cdot C}{FS \cdot VE} \quad e \quad \lambda = \frac{VE}{C}$$

- C - ciclo do semáforo;
- F - fluxo médio de veículos;
- FS - fluxo de saturação;
- VE - verde efetivo.

Examinemos na Tabela 2.3, por exemplo, o atraso dos veículos junto à intersecção na situação em que o tempo de verde é 44 segundos:

X	AU	AA	AU + AA
0.8182	6.5310	0.92045	7.45145

Se as filas junto às intersecções posteriores nos levarrem à conclusão que os tempos perdidos por aqueles veículos junto à intersecção devem ser acrescidos de 2 segundos (diminuindo, portanto, o verde efetivo disponível àqueles veículos para 42 segundos), obteremos:

	X'	AU'	AA'	AU'+AA'
	0.8571	7.1112	1.28571	8.39691
cresceu	4.75%	8.88%	39.68%	12.69%

Assim, um acréscimo de 2 segundos nos tempos perdidos devido ao crescimento da fila em uma intersecção crítica afetou sensivelmente o atraso total dos veículos junto à intersecção anterior.

Ainda na Tabela 2.3, examinemos a última situação, quando o tempo de verde é 38 segundos. Neste caso, um aumento de um segundo nos tempos perdidos (devido a fila junto a intersec-

ções posteriores) causará um aumento de 5.88% no atraso uniforme, 105.41% no atraso aleatório e 38.21% no atraso total; e um aumento de 2 segundos levará este ramo a saturação.

Podemos observar estes mesmos resultados examinando tabelas semelhantes à Tabela 2.2 para outros valores de ciclo e fluxos, ou seja, que o atraso total é bastante sensível a variações dos tempos perdidos e que para altos graus de saturação, o atraso aleatório é bastante mais sensível que o atraso uniforme.

### 3. O MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação é baseado nos valores médios instantâneos de fluxo e fila de veículos, considerados em pontos estratégicos da rede de tráfego, relacionando-os com uma política de semáforos. O modelo é macroscópico, empírico, tem como índice de desempenho o atraso total médio dos veículos junto aos semáforos durante um ciclo fundamental da rede e só é aplicável sob a hipótese de que a rede de tráfego atinja o regime de equilíbrio permanente.

#### 3.1. A REDE DE TRÁFEGO

Descrevemos uma rede de tráfego com semáforos através de um grafo orientado onde cada semáforo é representado por um vértice (nó) enquanto que as arestas orientadas (ramos) representam as mãos de direção das ruas. Os ramos são divididos em dois grupos: ramos de entrada e ramos intermediários.

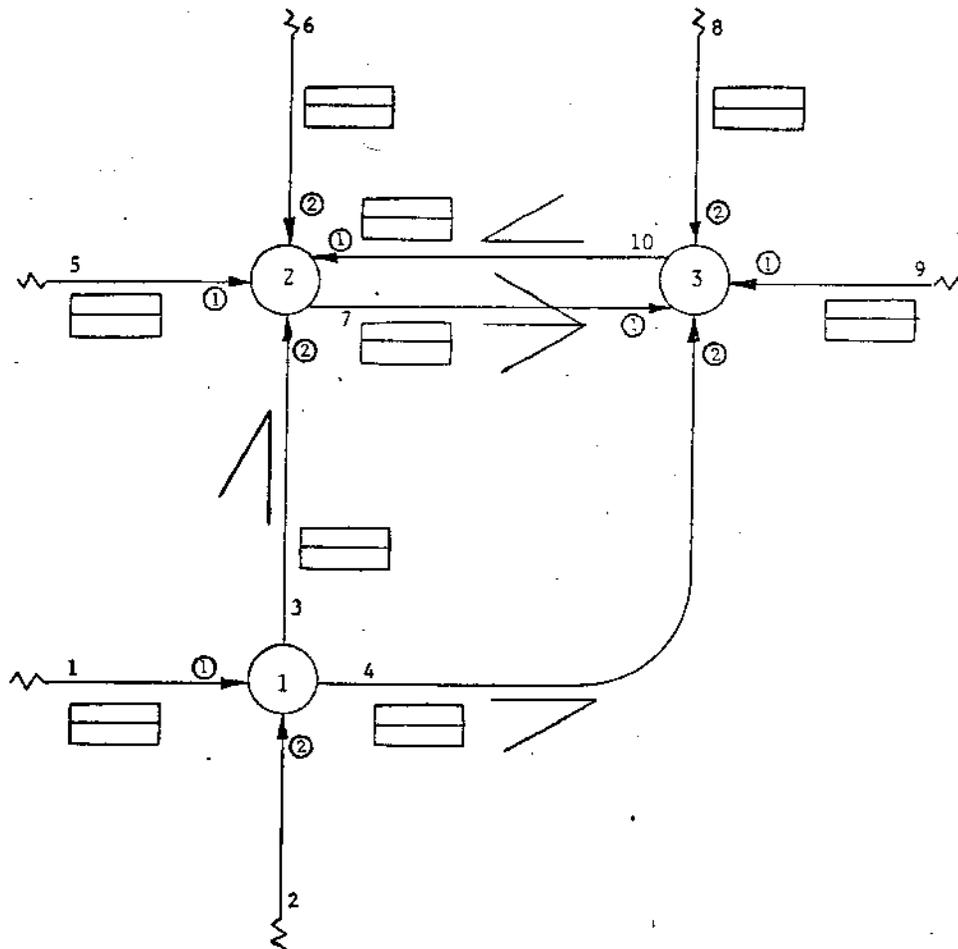
- Ramos intermediários são aqueles localizados entre dois semáforos.
- Ramos de entrada são aqueles que chegam a um semáforo mas não são provenientes de nenhum outro.

O deslocamento dos veículos dentro da rede é regulado por porcentagens de conversão entre os ramos. Tais valores exprimem o percentual do fluxo de veículos que deixam um dado ramo para ingressar em outro e são considerados constantes (inde-

pendentes da política de semáforos).

A aplicabilidade do modelo subacente que estejam satisfeitas as seguintes hipóteses:

- ramos não saturados (grau de saturação  $X < 1$ ) para que se possa alcançar um regime de equilíbrio;



- l - índice (número) de elementos
- (I) - índice do semáforo
- I - índice do ramo
- (i) - número da fase
- $P_1$   
 $P_2$   
 $P_3$  - percentagens de conversão (ver Figura 3.2)
- |      |
|------|
| 1111 |
| 2222 |

 - fluxo médio de veículos no ramo
- |      |
|------|
| 1111 |
| 2222 |

 - fluxo de saturação

Figura 3.1 - Representação gráfica de uma rede de tráfego com semáforos.

- todos os semáforos da rede são de duas fases com um tempo de ciclo comum (ciclo fundamental da rede) ou um tempo de ciclo que é a metade deste valor;
- fluxo de veículos constante nos ramos de entrada.

### 3.1.1. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA REDE DE TRÁFEGO COM SEMÁFOROS

A Figura 3.1 nos mostra a representação gráfica de uma rede de tráfego com semáforo. Associados a tal grafo encontram-se os seguintes dados:

- índice de cada semáforo;
- índice de cada ramo;
- a fase em que cada ramo chega ao semáforo;
- as porcentagens de conversão entre os ramos;
- fluxo médio de veículos;
- fluxo de saturação.

A Figura 3.2 mostra como indicar as porcentagens de conversão, que regulam o fluxo de veículos nos ramos intermediários. Nela o fluxo de veículos no ramo 4 é formado por:

- 20% de fluxo de veículos do ramo 1;
- 80% de fluxo de veículos do ramo 2;
- 75% do fluxo de veículos do ramo 3.

### 3.2. AS EQUAÇÕES DOS ELEMENTOS DA REDE

Utilizando os conceitos de tráfego definidos no Capítulo 2, vamos estabelecer as equações de estado que são a represen-

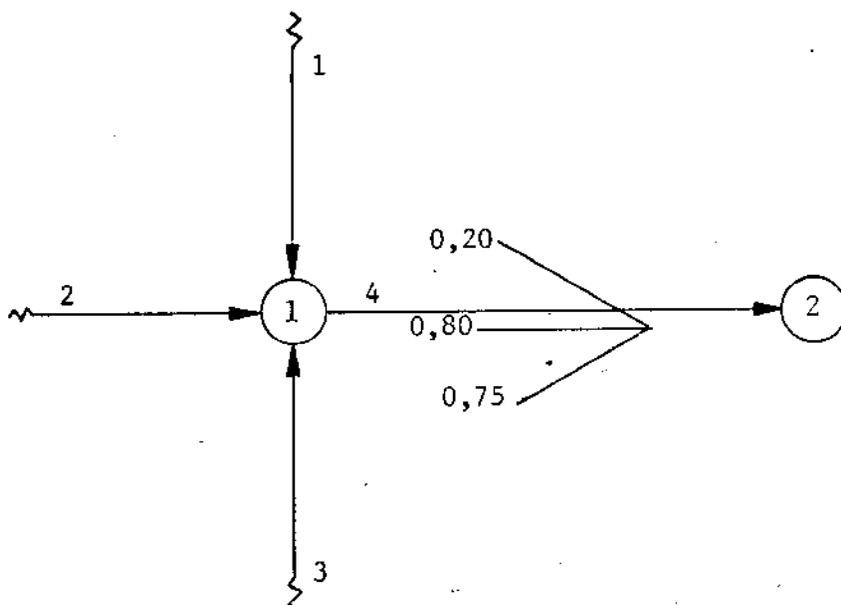


Figura 3.2 - Porcentagens de conversão

tação matemática dos elementos da rede.

### 3.2.1. SEMÁFOROS

O ciclo fundamental da rede (C) é dividido em 50 unidades de tempo (equação (3.1)). Assim o ciclo de cada semáforo terá 50 ou 25 intervalos de tempo dependendo da escolha do seu ciclo individual (C ou C/2 respectivamente). Esta divisão do ciclo permite soluções consistentes com a precisão de cálculo exigida e a capacidade de armazenamento e velocidade do computador. Além disto esta mesma discretização é normalmente usada em redes de tráfego [15].

$$DT = \frac{C}{50} \quad (3.1)$$

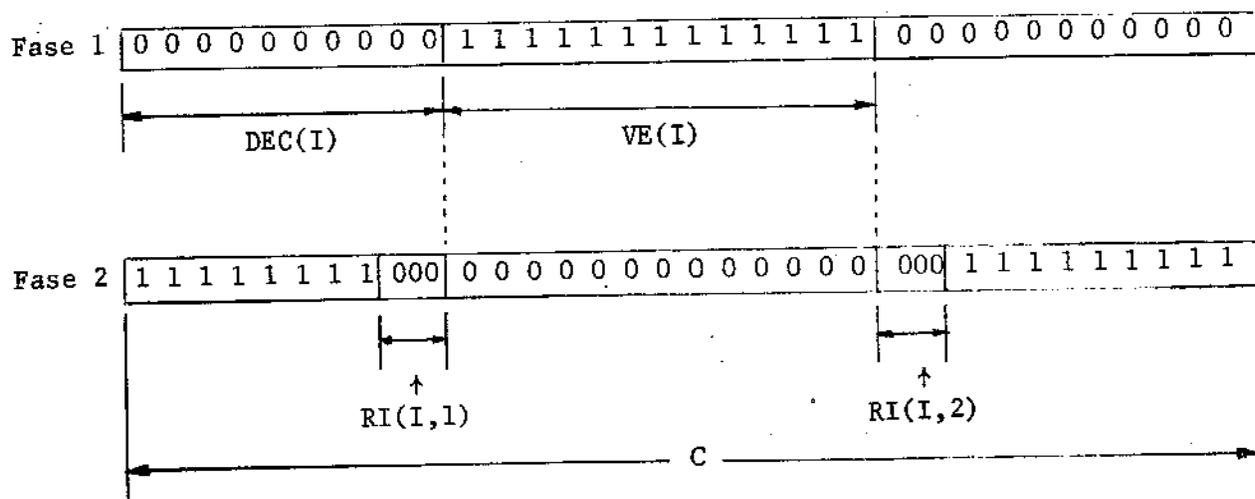
Um semáforo com indicações de vermelho, verde e amarelo é uma função periódica com período igual ao seu ciclo. Confor-

me vimos na secção 2.3.3, este trabalho considera o semáforo apenas com indicações de vermelho e verde, sendo a duração do verde igual ao verde efetivo da fase em questão.

Representaremos a estrutura de funcionamento dos semáforos da rede através de uma matriz tri-dimensional  $L(I,J,K)$ , que nos informa o estado da fase  $J$  do semáforo  $I$  no instante  $K$ .

A Figura 3.3 mostra a matriz  $L(I,J,K)$  para um semáforo particular.

Conhecendo-se os valores de ciclo ( $C$ ), verde efetivo ( $VE$ ), defasagem ( $DEC$ ) e vermelho integral ( $RI$ ) para cada intersecção,



- K - instante de tempo
- I - índice do semáforo
- J - fase do semáforo
- DEC(I) - defasagem absoluta do semáforo I
- VE(I) - verde efetivo da fase I do semáforo I
- RI(I,J) - tempo de vermelho integral na fase J do semáforo I
- $L(I,J,K) = 0$  - indicação de vermelho
- $L(I,J,K) = 1$  - indicação de verde

Figura 3.3 - A matriz semáforo  $L(I,J,K)$

a matriz semáforo fica completamente determinada.

Como vimos na secção 2.4.2.3, os tempos perdidos por veículos junto a uma intersecção sinalizada são função das características particulares da intersecção e das filas de veículos que se formam a partir de intersecções posteriores. Portanto, além de ciclo, verde efetivo e defasagem, para dispormos do controle do fluxo de veículos necessitamos conhecer o comprimento das filas de veículos e sua relação com as características físicas dos ramos nos quais se formam.

### 3.2.2. RAMOS

Em regime permanente periódico, a quantidade de veículos entrando em um ramo durante um ciclo deve ser igual a quantidade de veículos deixando-o.

Muitas vezes os dados podem indicar que o volume de tráfego entrando em um ramo não é igual ao volume de tráfego deixando-o. Isto pode ser devido, simplesmente, a erros na observação do fenômeno (por exemplo, quando os fluxos na entrada e na saída do ramo são medidos em horas ou dias diferentes), ou ainda à existência de "fontes" ou "sumidouros" de fluxo (locais no interior do ramo onde um certo volume de tráfego pode ingressar no ramo ou deixá-lo).

Diante da existência de uma "fonte" que gera um pequeno volume de tráfego, comparado com o fluxo ao longo do ramo, podemos ajustar as diferenças de fluxo na entrada e na saída, por exemplo adicionando veículos a uma taxa constante. Com um procedimento análogo podemos eliminar inconsistências nos dados geradas por "sumidouros" com pequenos volumes de tráfego.

Quando as diferenças são devidas a "fontes" ou "sumidouros" com grande volume de tráfego podemos tratá-las criando ramos artificiais [15].

O fluxo de veículos nos ramos da rede será descrito através de histogramas e das filas de veículos na linha de parada junto aos semáforos.

Cada ramo da rede é caracterizado por três tipos de histogramas (Figura 3.4), calculados em pontos estratégicos da rua, que são:

- histograma  $EN(M,K)$ : indica o número de veículos entrando no ramo  $M$ , no instante  $K$ ;
- histograma  $GO(M,K)$ : indica o número de veículos chegando ao fim do ramo  $M$ , no instante  $K$ ;
- histograma  $OUT(M,K)$ : indica o número de veículos deixando o ramo  $M$ , no instante  $K$ .

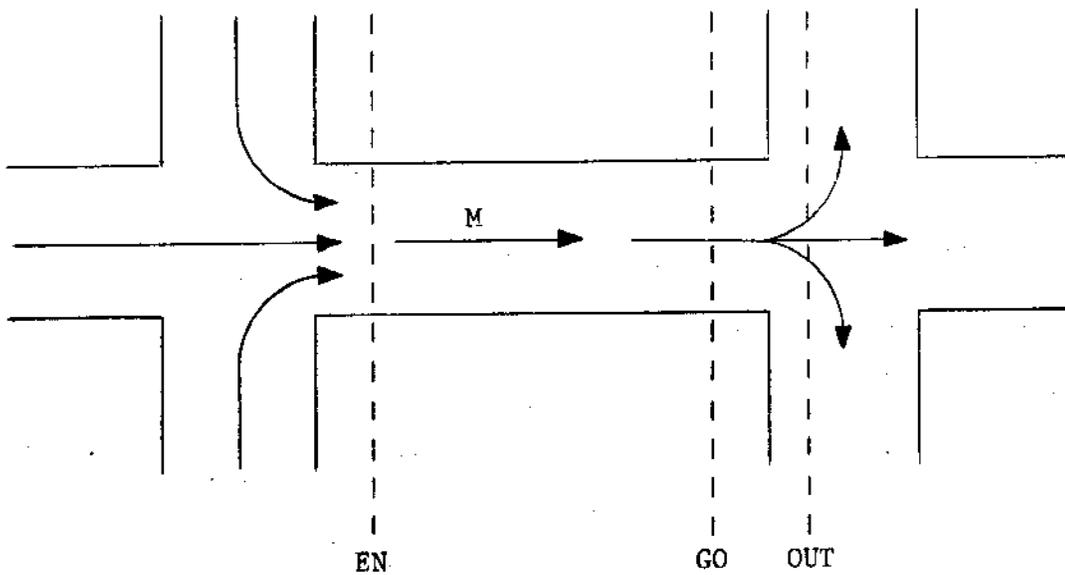


Figura 3.4 - Pontos de medição dos histogramas no ramo M

### 3.2.2.1. O HISTOGRAMA EN(M,K)

O histograma EN(M,K) é calculado apenas para os ramos intermediários da rede. Se o ramo M for de entrada, calcularemos apenas os seus histogramas GO(M,K) e OUT(M,K), uma vez que o fluxo de veículos em ramos de entrada é considerado constante.

A cada instante K do tempo o histograma EN do ramo intermediário M é uma função do histograma OUT dos ramos que fornecem fluxo para o ramo M bem como das porcentagens de conversão destes ramos para o ramo M:

$$EN(M,K) = \sum_{M1=NR(M,1)}^{M1=NR(M,R)} P(M1,M) \cdot OUT(M1,K) \quad (3.2)$$

onde:

K=1,2,...,50 - índice do intervalo de tempo considerado;

R - Número total de ramos que fornecem fluxo para o ramo M;

NR(M,J) - índice do ramo que fornece fluxo para o ramo M, vindo da direção J (J=1,...,R);

M1 - variável auxiliar que indica o índice dos ramos que fornecem fluxo ao ramo M;

P(M1,M) - porcentagem de conversão de veículos do ramo M1 para o ramo M.

OUT(M1,K) - quantidade de veículos deixando o ramo M1 no K-ésimo intervalo de tempo.

A Figura 3.5 mostra o histograma EN(M,K) característico de um ramo intermediário:

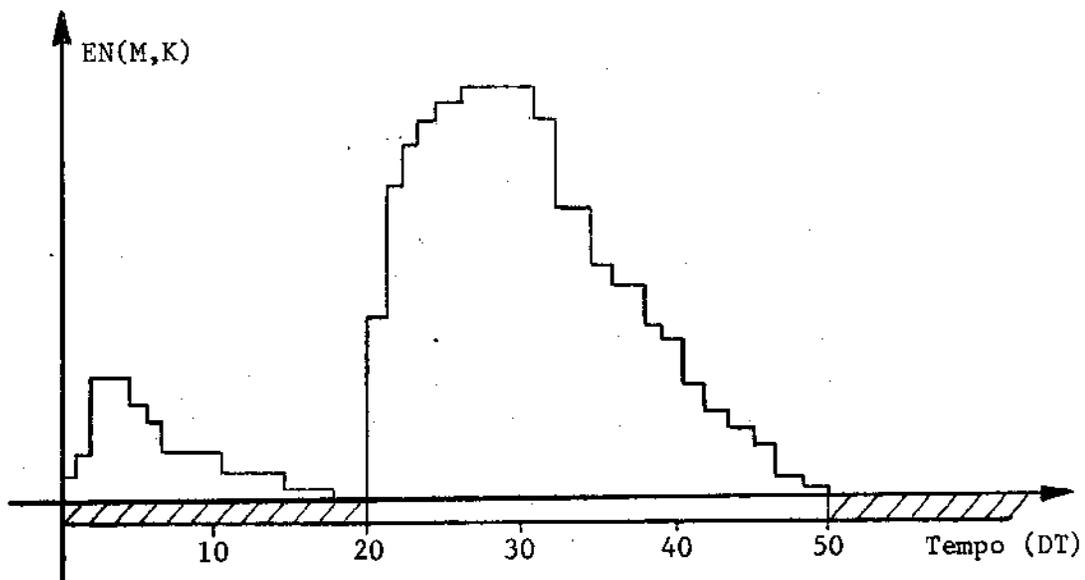


Figura 3.5 - O histograma EN(M,K)

### 3.2.2.2. O HISTOGRAMA $GO(M,K)$

Um semáforo, pela sua maneira de atuar, tende a criar pelotões de veículos a sua saída. Estes pelotões dispersam-se ao percorrer um ramo de um semáforo a outro, devido a diferenças nas velocidades dos veículos. Esta dispersão dos pelotões faz com que o histograma  $GO(M,K)$  dos ramos intermediários seja diferente do histograma  $EN(M,K)$ . A Figura 3.6 mostra histogramas simplificados de  $EN$  e  $GO$  para um ramo intermediário  $M$ .

Para um ramo de entrada o histograma  $GO(M,K)$  é constante no tempo, dependendo unicamente do seu fluxo médio de veícu-

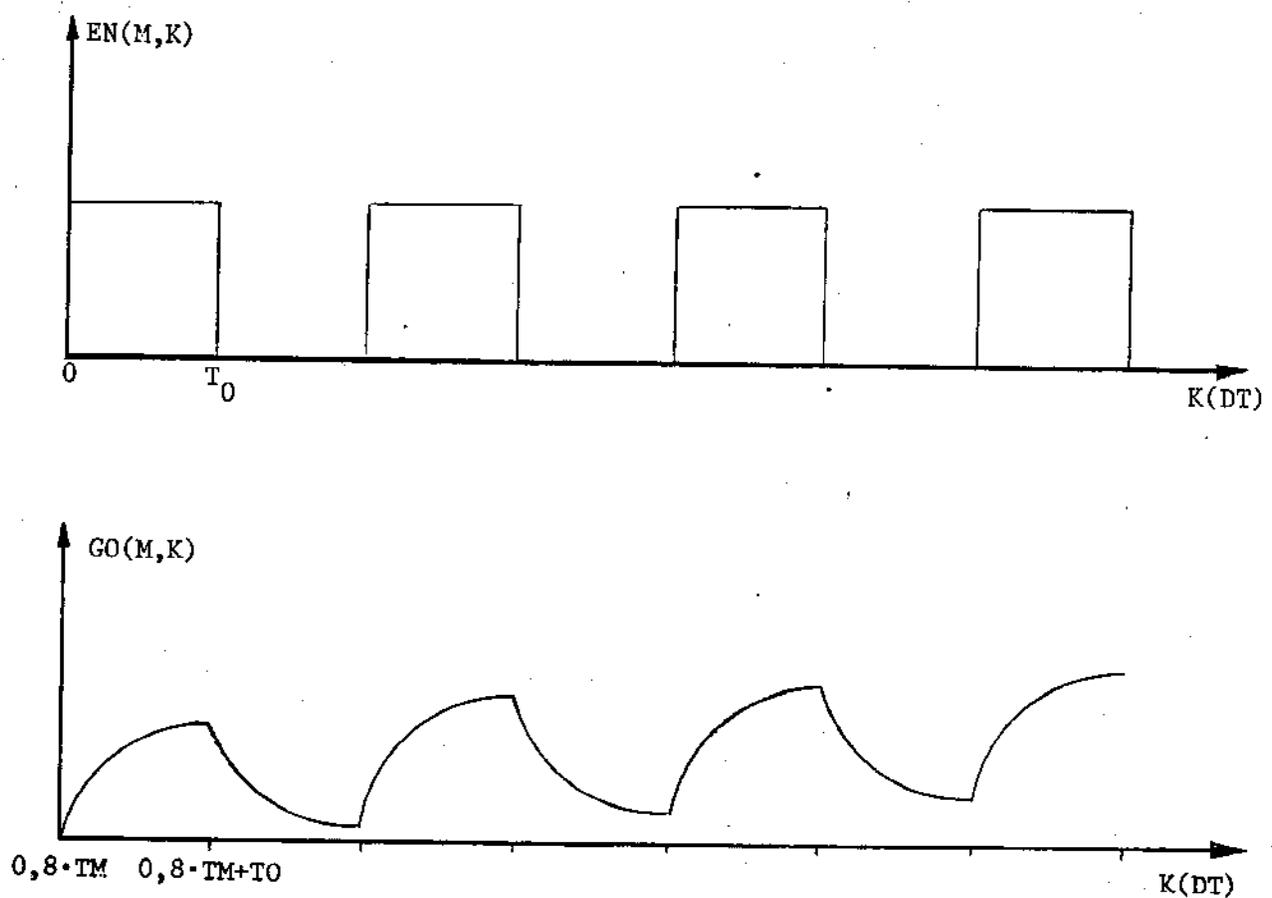


Figura 3.6 - Os histogramas  $EN(M,K)$  e  $GO(M,K)$

los:

$$GO(M,K) = F \cdot DT \quad (3.3)$$

onde F - fluxo de veículos;

$$DT = \frac{C}{50};$$

C - ciclo;

M - índice de um ramo de entrada.

Para os ramos intermediários, onde ocorre a dispersão dos pelotões, o histograma  $GO(M,K)$  é obtido através de um "alisamento" exponencial do histograma  $EN(M,K)$ . O grau deste "alisamento" é medido pelo *Fator de dispersão* que é função do tempo de percurso no ramo.

O fator de dispersão  $FD$  calculado na secção 2.4.2.1 é:

$$FD = \frac{1}{1+0.5 \cdot T}$$

onde  $T$  é o tempo de percurso do carro mais rápido. Conhecendo-se  $TM(M)$  o tempo médio de percurso no ramo  $M$ , é comum considerar-se que o tempo de percurso do carro mais rápido é, em média,  $T = 0.8 \cdot TM(M)$  [15]. Assim o fator de dispersão torna-se:

$$FD = \frac{1}{1+0.4 \cdot TM(M)} \quad (3.4)$$

Desta forma a equação geral que define o histograma  $GO(M,K)$  é:

$$GO(M,K) = FD \cdot EN(M,K-T) + (1-FD) \cdot GO(M,K-1), \quad (3.5)$$

para  $K=1,2,\dots,50$ , ou seja, o número de veículos chegando ao final de um ramo num dado instante de tempo, depende dos veículos que nele entraram  $T$  intervalos de tempo antes e dos veículos que chegaram ao fim do ramo no instante imediatamente anterior.

### 3.2.2.3. O HISTOGRAMA OUT(M,K)

O histograma  $OUT(M,K)$ , que indica o número de veículos que saem do ramo M a cada intervalo K de tempo, depende do estado do semáforo em que chega o ramo M, da capacidade máxima de escoamento de veículos do ramo (fluxo de saturação) e da fila de veículos neste ramo. Através da matriz semáforo  $L(I,J,K)$  (secção 3.2.1) temos conhecido o estado de cada fase de cada semáforo a cada intervalo de tempo. Como fluxo de saturação é conhecido e constante para cada ramo, a única dificuldade para o cálculo do histograma  $OUT(M,K)$  é determinar a quantidade de veículos parados em fila no ramo M, que passamos a calcular através da seguinte fórmula de recorrência:

$$Q(M,K) = Q(M,K-1) + GO(M,K) - OUT(M,K) \quad (3.6)$$

onde  $Q(M,K)$  indica a quantidade de veículos parados em fila no ramo M no instante K.

Como estamos trabalhando com cruzamentos não saturados, existe durante cada ciclo pelo menos um intervalo de tempo (o último intervalo com indicação de verde) em que a fila é nula. Considerando que o histograma da fila é periódico, inicializamos o processo por este intervalo de tempo, e obtemos, imediatamente o histograma de regime periódico.

Para calcular o histograma  $OUT(M,K)$ , consideramos duas situações:

a) com o semáforo indicando vermelho no instante K:

$$OUT(M,K) = 0 \quad (3.7)$$

b) com o semáforo indicando verde no instante K:

$$\text{OUT}(M,K) = \underline{\text{MIN}}\{Q(M,K-1) + \text{GO}(M,K), \text{FS}(M)\}, \quad (3.8)$$

onde  $\text{FS}(M)$  é o fluxo de saturação no ramo M.

### 3.3. A SEQÜENCIALIDADE NO CÁLCULO DOS HISTOGRAMAS

A Figura 3.7 mostra um conjunto de ramos de uma rede de tráfego que se apresenta sob a forma de "malha fechada" (a mão de direção dos ramos forma um anel). Para determinarmos os fluxos de veículos nestes ramos a cada intervalo de tempo, em

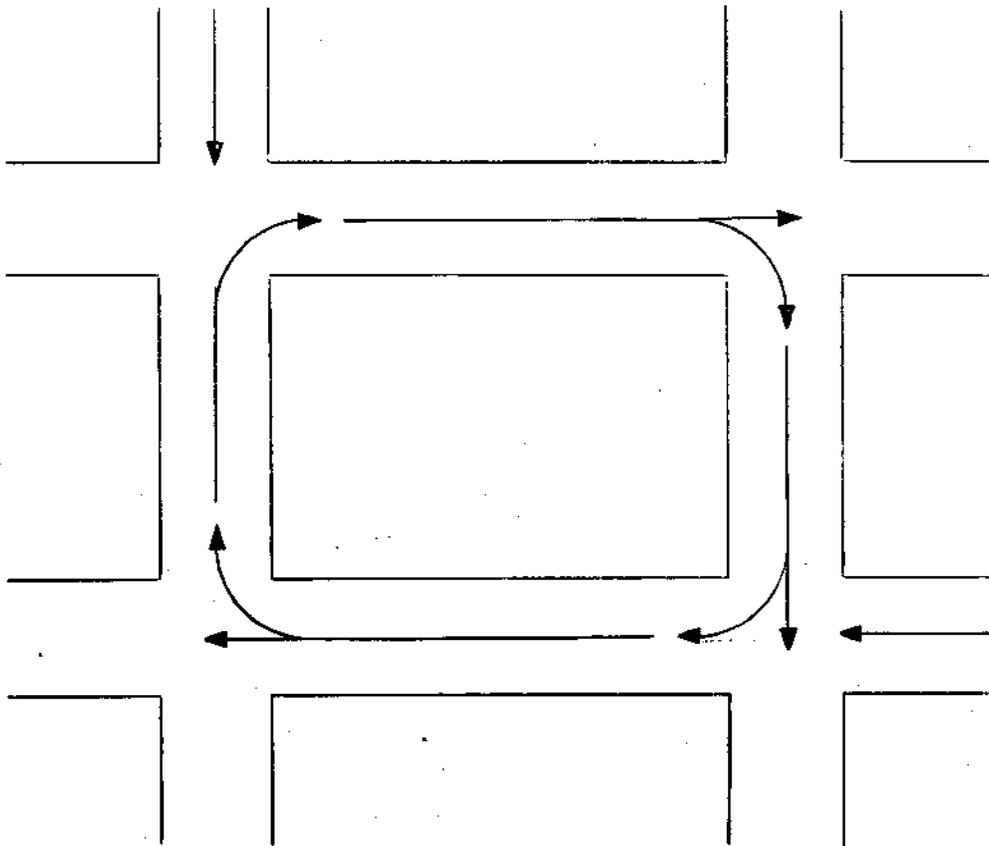


Figura 3.7 - Rede de tráfego sob a forma de malha fechada

regime de equilíbrio, devemos recorrer ao cálculo iterativo aumentando consideravelmente o tempo de cálculo.

Neste modelo o cálculo dos histogramas dos ramos é feito sequencialmente seguindo uma enumeração conveniente, e cada ramo é considerado uma única vez no cálculo do índice de desempenho (não existe iteração). Desta maneira necessitamos que a estrutura da rede de tráfego seja sob a forma de "árvore" (sem a formação de anéis), o que elimina as realimentações.

Para transformar uma rede sob a forma de malha fechada em uma estrutura de árvore, Robertson sugere a criação de um ramo "artificial" paralelo a um dos ramos reais de forma a romper o anel. O ramo artificial tem o mesmo fluxo total do ramo original, mas seu histograma EN é constante durante todo o ciclo. O histograma OUT do ramo artificial é então utilizado como uma aproximação do ainda desconhecido histograma OUT do ramo original para o cálculo do histograma EN do ramo seguinte do anel. Assim os histogramas dos outros ramos do anel (inclusive aquele que "gerou" o ramo artificial) podem ser calculados seqüencialmente.

Os ramos artificiais não são considerados no cálculo do índice de desempenho, isto é, para o cálculo dos atrasos somente os ramos reais são computados. Assim o único erro introduzido por um ramo artificial é uma pequena distorção no histograma EN do ramo imediatamente posterior no anel. Esta distorção tende ainda a diminuir se criarmos ramos artificiais paralelos a ramos com as seguintes características:

- 1) ramos com baixo fluxo de veículos, pois suas contribuições no cálculo dos atrasos são pequenas, ou,
- 2) ramos com um alto grau de saturação, pois suas contribuições ao índice de desempenho não poderão ser significativamente alteradas pelo processo de otimização, ou,

3) ramos com um alto tempo de percurso, pois o processo de dispersão dos veículos ao longo do ramo faz com que o fluxo chegando à intersecção seja praticamente constante, não se introduzindo, assim, erros significativos.

A criação de ramos artificiais permite, desta maneira, que os ramos da rede sejam enumerados convenientemente permitindo que seus histogramas sejam calculados seqüencialmente sem a necessidade de processos interativos de cálculo.

#### 3.4. O ÍNDICE DE DESEMPENHO

O índice de desempenho é o critério adotado para julgar a eficiência de uma determinada política de semáforos. Neste trabalho o índice de desempenho representa o atraso total médio em regime permanente dos veículos junto aos semáforos por unidade do ciclo fundamental da rede, e inclui um processo de penalização para cada parada de veículo junto aos semáforos.

O atraso total médio é obtido através da soma dos atrasos de cada ramo:

$$AT = \sum_{M=1}^{MM} AR(M) \quad (3.9)$$

onde

AT - atraso total médio da rede;

AR(M) - atraso do ramo M;

MM - nº de ramos da rede.

O atraso em cada ramo da rede é calculado a partir de três componentes: Atraso Uniforme, Atraso Aleatório e Atraso por paradas.

### 3.4.1. O ATRASO UNIFORME

O atraso uniforme em um ramo M é dado pelo produto do número total de veículos que param pelo tempo que permanecem parados. Neste modelo o atraso uniforme é obtido por:

$$AU(M) = \frac{1}{50} \left[ \sum_{K=1}^{50} Q(M,K) \right] \quad (3.10)$$

onde  $Q(M,K)$  é a fila de veículos no ramo M no instante K.

### 3.4.2. O ATRASO ALEATÓRIO

Conforme foi descrito na secção 2.4.2.2, o atraso aleatório é a componente do atraso total que considera as características aleatórias da chegada de veículos a uma intersecção:

$$AA(M) = \frac{(X(M))^2}{4(1-X(M))} \quad (3.11)$$

onde  $X(M)$  é o grau de saturação no ramo M, dado por

$$X(M) = \frac{F \cdot C}{FS \cdot VE} \quad (3.12)$$

onde:

F - fluxo médio de veículos no ramo M;

FS - fluxo de saturação do ramo M;

VE - verde efetivo da fase do semáforo em que chega o ramo M;

C - ciclo.

### 3.4.3. O ATRASO POR PARADAS

Um acréscimo no número de paradas dos veículos na rede

tende a aumentar não sô o desconforto dos motoristas como também o número de acidentes. O atraso por paradas considera a necessidade de penalizar tais acréscimos.

Através dos histogramas  $GO(M,K)$  e  $Q(M,K)$  podemos calcular um histograma  $B(M,K)$  que representa o número de paradas no ramo  $M$  no instante  $K$ :

$$B(M,K) = \underline{\text{MIN}}\{Q(M,K), GO(M,K)\} \quad (3.13)$$

onde  $B(M,K)$  é o número de veículos que param no ramo  $M$  no instante  $K$ .

Vamos anotar por  $PP$  a penalização imposta a cada parada. Assim o atraso por paradas  $AP$  para um ramo  $M$  fica:

$$AP(M) = \frac{PP}{50} \left[ \sum_{K=1}^{50} B(M,K) \right] \quad (3.14)$$

#### 3.4.4. O ATRASO TOTAL

O atraso de um ramo  $M$  é a soma dos atrasos uniforme, aleatório e por paradas para aquele ramo:

$$AR(M) = AU(M) + AA(M) + AP(M) \quad (3.15)$$

O atraso total médio da rede de tráfego é a soma dos atrasos de todos os ramos:

$$AT = \sum_{M=1}^{MM} AR(M)$$

ou ainda:

$$AT = \sum_{M=1}^{MM} [AU(M) + AA(M) + AP(M)] \quad (3.16)$$

A unidade de atraso considerada é veículo vezes segundo por segundo (veíc. seg./seg.).

### 3.5. A INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS NO ÍNDICE DE DESEMPENHO

Na secção 2.4.2.3 mostramos que o crescimento da fila de veículos que se forma a partir de uma intersecção crítica afeta os tempos perdidos dos veículos junto a uma intersecção anterior. Assim, sempre que a fila de veículos ultrapassa um certo comprimento crítico ela provoca um aumento dos tempos perdidos dos veículos junto a uma intersecção anterior, fazendo com que estes disponham de um tempo verde menor que aquele que o semáforo indica.

A consequência deste crescimento excessivo da fila de veículos é uma possível diminuição do verde efetivo que é disponível para cada ramo de cada fase de um semáforo imediatamente anterior. Esta diminuição do verde efetivo irá alterar a matriz semáforo, que deverá ser recalculada cada vez que uma fila alcança um certo comprimento crítico.

A alteração na matriz semáforo, causada pela diminuição do verde efetivo devido ao aumento nas filas de veículos, irá alterar os histogramas dos ramos chegando ao semáforo considerado, fazendo com que a forma seqüencial de cálculo dos histogramas fique seriamente prejudicada, pois para calcularmos o fluxo de veículos em dado ramo a cada intervalo de tempo deveremos conhecer o comprimento das filas (e, em consequência, o fluxo de veículos a cada intervalo de tempo) nos ramos que recebem fluxo do ramo citado.

A perda de seqüencialidade nos cálculos e a necessidade de recalcular os histogramas dos ramos cada vez que uma fila de veículos alcança o seu comprimento crítico, implicam em um considerável aumento no esforço computacional.

Passamos agora a analisar os efeitos desta diminuição do verde efetivo devido ao crescimento das filas de veículos em cada componente do índice de desempenho da rede.

### 3.5.1. A INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS

#### NO ATRASO ALEATÓRIO

O atraso aleatório AA (expressão (3.11)) é função do grau de saturação X (expressão (3.12)) de cada ramo, e este, por sua vez, pode ser calculado sem a utilização dos histogramas. Para considerarmos o efeito das filas de veículos no grau de saturação (e, em conseqüência, no atraso aleatório) basta que conheçamos a quantidade de verde efetivo que é "perdida" por cada ramo devido aos comprimentos das filas de veículos nos ramos posteriores.

Cabe ainda salientar que o fluxo médio de veículos por ciclo em cada ramo é independente da política de semáforos, já que é função dos fluxos nos ramos de entrada e das porcentagens de conversão de veículos de ramo para ramo, ambos independentes da política de semáforos.

Portanto, para considerarmos o efeito das filas de veículos no atraso aleatório, não necessitamos recalcular os histogramas de cada ramo ao detectarmos uma fila ultrapassando o seu comprimento crítico.

### 3.5.2. A INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS

#### NO ATRASO UNIFORME

O atraso uniforme de veículos em um ramo (expressão (3.10)) é o número de veículos que param junto à intersecção pelo tempo que permanecem parados. Seu cálculo é feito a partir do histograma das filas de veículos junto a uma intersecção, o qual é computado com o auxílio dos histogramas  $GO(M,K)$  e  $OUT(M,K)$ . Desta forma, para o cálculo do atraso uniforme, usamos fortemente os histogramas dos ramos.

Portanto, para considerarmos o efeito das filas de veículos no atraso uniforme, necessitamos não só atualizar a matriz semáforo mas também recalcular os histogramas dos ramos cada vez que uma fila ultrapassa o seu comprimento crítico.

### 3.5.3. A INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS

#### NO ATRASO POR PARADAS

O atraso por paradas dos veículos em um ramo (expressão (3.14)) penaliza o número de paradas dos veículos na rede. É função do histograma do número de paradas, que, por sua vez, é obtido a partir dos histogramas  $GO(M,K)$  e  $Q(M,K)$ .

Portanto, como no caso do atraso uniforme, para considerarmos o efeito das filas de veículos no atraso por paradas, necessitamos atualizar a matriz semáforo bem como recalcular os histogramas dos ramos cada vez que detectarmos uma fila ultrapassando o seu comprimento crítico.

### 3.6. TRATAMENTO DA INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS

Neste modelo utilizaremos o caráter de "função de pena-

lidade" do atraso aleatório (secção 2.4.2.2) para considerar o efeito das filas de veículos em uma intersecção crítica sobre os veículos deixando uma intersecção anterior. Cada vez que a fila de veículos em um ramo ultrapassa um certo "limite de fila", o tempo de verde efetivo que é disponível para cada ramo de cada fase do semáforo imediatamente anterior é "penalizado" (diminuindo). Como o atraso aleatório é função do grau de saturação, e este é calculado por ramo, sempre que a fila de veículos ultrapassa um certo limite de fila em um ramo, o grau de saturação dos ramos que chegam à intersecção imediatamente anterior, e fornecem fluxo para aquele ramo, passa a ser calculado com um tempo de verde menor que o verde indicado pelo semáforo, e esta diminuição do tempo verde é calculado *por ramo* e depende da indicação do semáforo (verde ou vermelho), do comprimento da fila e da porcentagem de conversão de cada ramo para aquele ramo onde a fila se localiza.

Como vimos nas secções 3.5.2 e 3.5.3, para considerarmos o efeito do crescimento das filas de veículos nos atrasos uniforme e por paradas, necessitamos, a cada fila detectada, atualizar a matriz semáforo e recalcular os histogramas dos ramos afetados. Tal procedimento impede o cálculo seqüencial dos fluxos de veículos e dos histogramas, aumentando consideravelmente os gastos computacionais.

Para garantir a seqüencialidade nos cálculos e evitar que os histogramas necessitem ser recalculados (iterativamente) cada vez que uma fila atinge o seu limite de fila, vamos desprezar o efeito das filas de veículos sobre os histogramas dos ramos anteriores.

Ao desprezarmos o efeito das filas de veículos sobre os histogramas dos ramos anteriores estamos cometendo um erro no cálculo dos atrasos uniforme e por paradas destes ramos, que passamos a calcular através de um exemplo ilustrativo.

A partir dos dados da Tabela 2.3 vamos tentar quantificar o erro cometido ao se desprezar o efeito das filas de veículos no atraso uniforme dos ramos anteriores. Naquela tabela os valores foram obtidos através da expressão (2.13) que considera um fluxo constante de veículos. Neste modelo o fluxo de veículos nos ramos intermediários não é constante e depende da política de semáforos, fazendo com que a defasagem entre semáforos seja elemento importante e torne o atraso uniforme menor que aquele tomado a fluxo constante. Assim os erros obtidos a partir da Tabela 2.3 tendem a se tornar um limitante superior do erro cometido ao se desprezar o efeito das filas de veículos no atraso uniforme dos ramos anteriores.

Consideremos na Tabela 2.3, por exemplo, o atraso de veículos junto à intersecção na situação em que o tempo de verde é 44 segundos. Neste caso os valores dos atrasos são:

$$\left. \begin{array}{l} AU = 6.5310 \\ AA = 0.92045 \end{array} \right\} AU + AA = 7.45145$$

Considerando que exista um acréscimo de dois segundos nos tempos perdidos (e, em consequência, uma diminuição de dois segundos no verde efetivo) devido às filas de veículos em ramos posteriores, teremos:

$$\left. \begin{array}{l} AU' = 7.1112 \\ AA' = 1.28571 \end{array} \right\} AU' + AA' = 8.39691$$

Se este acréscimo nos tempos perdidos fosse desprezado no cálculo do atraso uniforme, nós teríamos:

$$\left. \begin{array}{l} AU = 6.5310 \\ AA' = 1.28571 \end{array} \right\} AU + AA' = 7.8671,$$

o que acarreta um erro de 6.31%.

No exemplo considerado o valor do grau de saturação (para 44 segundos de tempo de verde) é 0.8182. Para valores mais altos do grau de saturação este erro diminui em valores relativos sensivelmente, sendo aproximadamente 6% para graus de saturação em torno de 0.9 (graus de saturação em torno de 0.9 são bastante comuns em políticas de semáforos próximas da política ótima).

Considerando que, neste modelo, o fluxo de veículos não é constante nos ramos intermediários, este erro tenderá a diminuir em consequência da atuação da defasagem, fazendo com que, ao desprezã-lo, não estejamos invalidando o modelo.

### 3.6.1. CÁLCULO DO VERDE EFETIVO PERDIDO

#### DEVIDO ÀS FILAS DE VEÍCULOS

Na secção anterior vimos que sempre que a fila de veículos ultrapassa um certo limite de fila em um ramo crítico, o grau de saturação dos ramos que chegam à intersecção anterior e fornecem fluxo para aquele ramo passa a ser calculado com um tempo de verde menor que o verde indicado pelo semáforo. Assim o grau de saturação de cada ramo que chega ao semáforo anterior (e fornece fluxo para o ramo onde a fila se localiza) é calculado com um "verde efetivo modificado" (expressão 3.17).

$$VEM(M) = VE + DVE(M) \quad (3.17)$$

$$DVE(M) \leq 0,$$

onde

VEM(M) - verde efetivo modificado (visto pelo ramo M);

VE - verde efetivo da fase do semáforo que controla o ramo M;

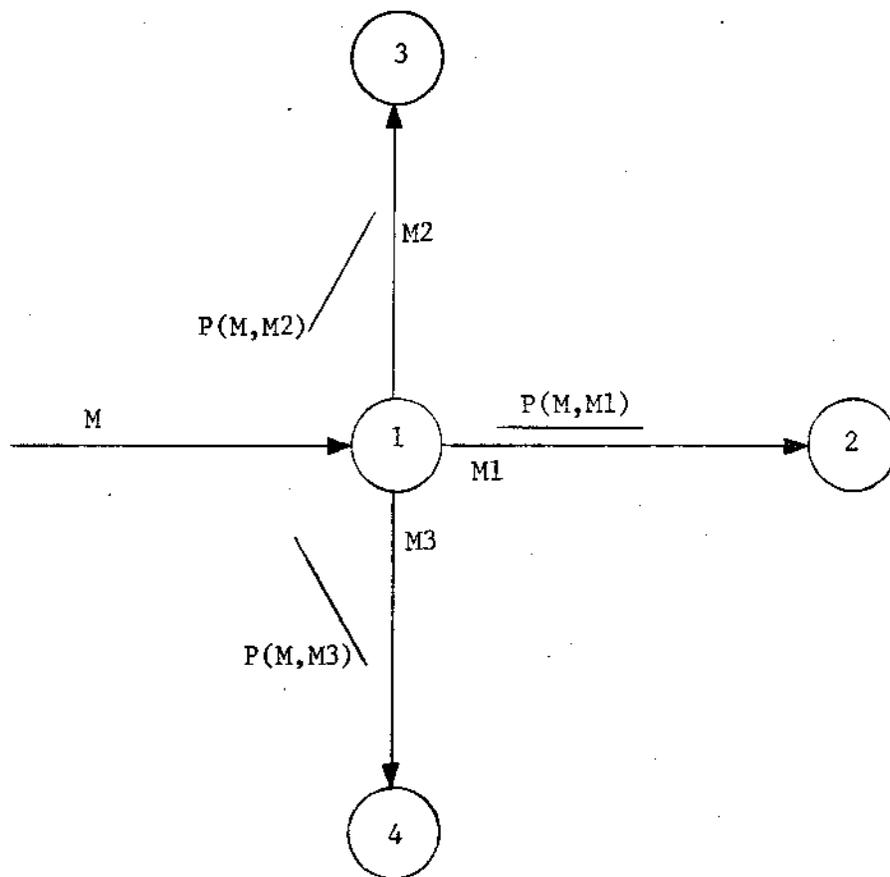
DVE(M) - tempo de verde efetivo perdido pelos veículos que deixam o ramo M devido às filas de veículos nos ramos posteriores.

O valor DVE(M) depende das filas de veículos nos ramos para os quais o ramo M fornece fluxo e dos tempos de verde efetivo e verde mínimo da fase do semáforo que o controla.

Para cada ramo intermediário da rede determinamos um parâmetro que indica o valor máximo para o comprimento da fila de veículos que pode se formar neste ramo sem interferir no desempenho dos veículos que deixam a intersecção anterior e fornecem fluxo para o ramo onde a fila se localiza. A tal parâmetro, que depende das características físicas de cada ramo, chamamos "limite de fila" do ramo M e notamos por LF(M).

Através de um exemplo ilustrativo e com o auxílio da Figura 3.8 vamos explicar o procedimento de cálculo dos tempos perdidos pelos veículos deixando o ramo M (DVE(M)) devido às filas de veículos nos ramos M1, M2 e M3.

Enquanto a fase do semáforo que controla o ramo M apresenta um período de indicação de verde, parte dos veículos que deixam o ramo M ingressam no ramo M1. Se durante este período de indicação de verde a fila no ramo M1 ultrapassar o seu limite de fila (LF(M1)), o tempo perdido na saída pelos veícu-



P(M,MI) - porcentagem de conversão de veículos do ramo M para o ramo MI

Figura 3.8 - Rede de tráfego para o cálculo de DVE(M)

los que deixam o ramo M e ingressam no ramo M1 aumenta. Em consequência o tempo de verde disponível para estes veículos diminui, e esta diminuição é medida por DVE(M). A forma que adotamos, aproveitando características intrínsecas das redes de tráfego, para o cálculo de DVE(M) é representada pela Figura 3.9 e pela expressão (3.18):

$$DVE(M) = \begin{cases} 0 & \text{se } Q(M1) \leq LF(M1) \\ (VE(1) - 0.9 \cdot VMIN(1)) \cdot \left[ e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{Q(M1) - LF(M1)}{SIG(M1)} \right)^2} - 1 \right] & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.18)$$

se  $Q(M1) > LF(M1)$ , onde

$Q(M1)$  - comprimento máximo da fila no ramo M1 durante o tempo de verde da fase do semáforo que controla o ramo M;

$LF(M1)$  - limite da fila no ramo M1;

$SIG(M1)$  - ponto de inflexão da curva, função das características do ramo M1;

$VE(1)$  - verde efetivo da fase do semáforo que controla o ramo M;

$VMIN(1)$  - verde mínimo da fase do semáforo que controla o ramo M.

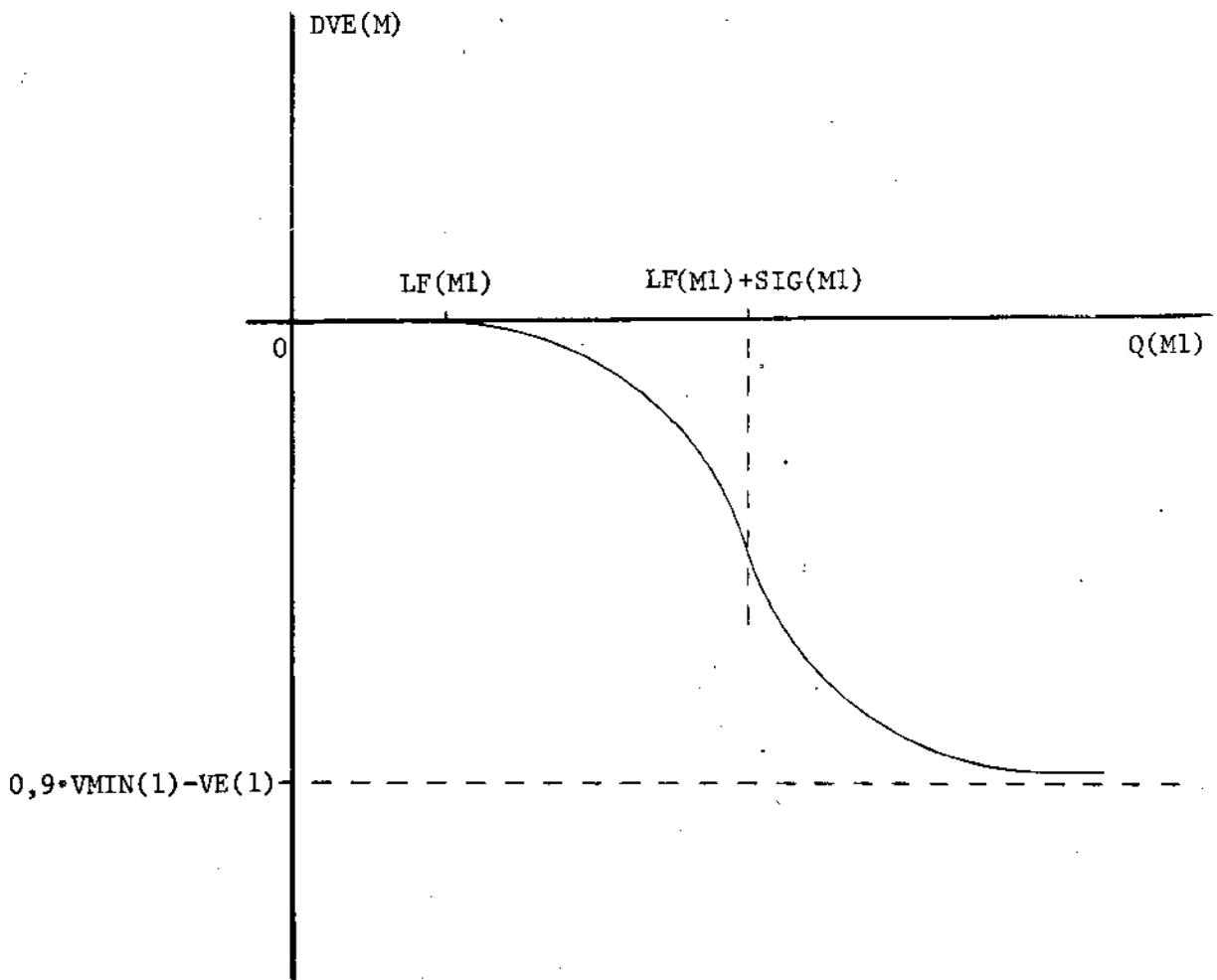


Figura 3.9 - DVE(M)

Em geral o fluxo de veículos que deixa o ramo M dirige-se a vários outros ramos. No exemplo da Figura 3.8 somente uma parte do fluxo de veículos que deixa o ramo M ingressa no ramo M1, assim somente estes veículos sofrerão um acréscimo nos tempos perdidos devido à fila que se forma no ramo M1. Portanto é razoável considerar a porcentagem de conversão de veículos do ramo M para o ramo M1 como uma boa maneira de ponderar o acréscimo nos tempos perdidos pelos veículos deixando o ramo M devido a fila de veículos no ramo M1. Desta forma, para determinar o tempo de verde efetivo perdido, devido à fila de veículos no ramo M1, pelos veículos que deixam o ramo M e ingressam no ramo M1, devemos multiplicar a expressão (3.18) pela porcentagem de conversão de veículos do ramo M para o ramo M1 ( $P(M, M1)$ ).

Estendendo este procedimento devemos considerar que o ramo M pode fornecer fluxo para diversos outros ramos (vide Figura 3.8) e estes podem conter filas excedendo o seu limite de fila. Portanto, para calcular o acréscimo nos tempos perdidos pelos veículos que deixam o ramo M devido às filas de veículos nos ramos posteriores, devemos considerar todos os ramos para os quais o ramo M fornece fluxo. Observando tais considerações, obtemos a expressão (3.19) que nos indica o verde efetivo modificado visto pelos veículos que deixam o ramo M.

$$VEM(M) = VE + \sum_{Mi} P(M, Mi) \cdot DVE_{Mi}(M), \quad (3.19)$$

onde

$VEM(M)$  - verde efetivo modificado visto pelo ramo M;

$VE$  - verde efetivo da fase do semáforo que controla o ra-

no M;

$P(M, Mi)$  - porcentagem de conversão de veículos do ramo M para o ramo  $Mi$ ;

$DVE_{Mi}(M)$  - tempo perdido devido a fila no ramo  $Mi$  pelos veículos que deixam o ramo M;

$Mi$  - índice dos ramos para os quais o ramo M fornece fluxo.

Uma vez obtido o verde efetivo modificado "visto" por um certo ramo podemos calcular o seu grau de saturação modificado (expressão (3.20)) e através dele obter o atraso aleatório dos veículos naquele ramo (expressão (3.21)):

$$X_{MOD}(M) = \frac{F \cdot C}{FS \cdot VEM(M)}, \quad (3.20)$$

onde

$X_{MOD}(M)$  - grau de saturação modificado do ramo M;

F - fluxo médio de veículos no ramo M;

FS - fluxo de saturação do ramo M;

C - ciclo individual do semáforo que controla o ramo M;

$VEM(M)$  - verde efetivo modificado visto pelos veículos que deixam o ramo M.

$$AA_M = \frac{(X_{MOD}(M))^2}{4(1-X_{MOD}(M))}, \quad (3.21)$$

onde  $AA_M$  é o atraso aleatório dos veículos do ramo M.

O cálculo de  $DVE(M)$  é feito por ciclo para cada ramo M da rede, e por isso necessitamos de comprimentos das filas de veículos que sejam constantes durante todo um ciclo. A fila de veículos em cada ramo é medida pelo histograma da fila  $B(M, K)$

(secção 3.2.2.3) que nos indica a quantidade de veículos parados em fila no ramo M no instante K.

Neste modelo, utilizando o histograma de fila  $B(M,K)$  e a matriz semáforo  $L(I,J,K)$  (secção 3.2.1), calculamos  $DVE(M)$  considerando a fila máxima em cada ramo que recebe fluxo do ramo M durante o período no qual a fase do semáforo que controla o ramo M tem indicação de verde. Ao considerarmos tal fila máxima estamos acentuando o caráter de penalização do atraso aleatório.

A forma e os parâmetros que utilizamos para o cálculo de  $DVE(M)$  são hipóteses que necessitam ser testadas na prática. Uma vez que se realizem testes de campo, a forma e os parâmetros para o cálculo de  $DVE(M)$  podem mudar, mas algumas características que foram utilizadas neste modelo deverão ser consideradas em qualquer nova formulação, pois são absolutamente coerentes com os resultados obtidos por Pignataro. Dentre tais características estão:

- utilizar a porcentagem de conversão de veículos entre os ramos considerados para ponderar o acréscimo nos tempos perdidos na saída, pelos veículos que deixam um certo ramo, devido às filas de veículos nos ramos posteriores;
- considerar o comprimento das filas de veículos nos ramos posteriores somente durante o período no qual a fase do semáforo que controla o ramo anterior tiver indicação de verde, isto é, o acréscimo nos tempos perdidos na saída pelos veículos que deixam um certo ramo M, devido às filas de veículos nos ramos posteriores, se-

rá penalizado com a fila nestes ramos durante o período em que aqueles veículos "enxergam" tais filas.

Tabela 3.1 - Equações da rede de tráfego e índice de desempenho

1. Equações da rede de tráfego

- Histograma  $EN(M,K)$  - indica o número de veículos entrando no ramo M, no instante K.

$$EN(M,K) = \sum_{M1=NR(M,1)}^{M1=NR(M,R)} P(M1,M) \cdot OUT(M1,K)$$

- Histograma  $GO(M,K)$  - indica o número de veículos chegando ao final do ramo M, no instante K.

$$GO(M,K) = FD \cdot EN(M,K-T) + (1-FD) \cdot GO(M,K-1)$$

- Histograma  $OUT(M,K)$  - indica o número de veículos deixando o ramo M, no instante K.

$$OUT(M,K) = \begin{cases} 0 & \text{se } L(I,J,K) = 0 \\ \underline{\text{MIN}}\{FS(M), Q(M,K-1) + GO(M,K)\} & \text{se } L(I,J,K) = 1 \end{cases}$$

onde

I - índice do semáforo que controla o ramo M;

J - fase do semáforo que controla o ramo M;

L(I,J,K) - matriz semáforo - indica o estado (verde ou vermelho) da fase J do semáforo I, no instante K. Na obtenção da matriz semáforo não consideramos, no verde efetivo do semáforo I, a influência das filas nos

ramos que recebem o fluxo que deixa este semáforo.

- Histograma  $Q(M,K)$  - indica o número de veículos em fila no ramo M, no instante K.

$$Q(M,K) = Q(M,K-1) + GO(M,K) - OUT(M,K)$$

- Histograma  $B(M,K)$  - indica o número de veículos que param no ramo M, no instante K.

$$B(M,K) = \underline{\text{MIN}}\{Q(M,K), GO(M,K)\}$$

## 2. Índice de desempenho

- Atraso uniforme  $AU_M$  - é o produto do número de veículos que param no ramo M, durante um ciclo, pelo tempo que ficam parados.

$$AU_M = \frac{1}{50} \cdot \sum_{K=1}^{50} Q(M,K)$$

- Grau de saturação modificado  $X_{MOD}(M)$  - calculado a partir do verde efetivo modificado visto pelo ramo M (considerando, portanto, a influência das filas de veículos no desempenho dos veículos nos ramos anteriores).

$$X_{MOD}(M) = \frac{F \cdot C}{FS \cdot VEM(M)}$$

onde  $VEM(M)$  é o verde efetivo modificado visto pelos veículos que deixam o ramo M, calculado como função do verde efetivo da fase do semáforo que controla o ramo M e dos tempos perdidos devido a

influência das filas de veículos nos ramos posteriores.

- Atraso aleatório  $AA_M$  - é a componente do atraso total que considera as características aleatórias da chegada de veículos a uma intersecção.

$$AA_M = \frac{(X_{MOD}(M))^2}{4 \cdot (1 - X_{MOD}(M))}$$

- Atraso por paradas  $AP_M$  - é a componente do atraso total que considera a necessidade de penalizar o número de paradas dos veículos na rede.

$$AP_M = \frac{PP}{50} \cdot \sum_{K=1}^{50} B(M,K),$$

onde PP é a penalização imposta a cada parada.

- Atraso total AT é o índice de desempenho da rede e representa o atraso total médio em regime permanente dos veículos junto aos semáforos por unidade do ciclo fundamental da rede.

$$AT = \sum_{M=1}^{MM} [AU_M + AA_M + AP_M],$$

onde MM é o número de ramos da rede de tráfego.

#### 4. O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Considerando-se as equações e o índice de desempenho da rede de tráfego (Tabela 3.1), o problema de otimizar a política de semáforos desta rede consiste em determinar um conjunto de defasagens, tempos de verde e ciclos (na forma  $C$  ou  $C/2$ ) para cada semáforo que minimize o atraso total médio dos veículos junto aos semáforos, ou seja, determinar um conjunto de defasagens, tempos de verde e ciclos que minimize o índice de desempenho. Dado que as equações da rede são não-lineares e o índice de desempenho é uma função não-convexa não dispomos de métodos analíticos para resolver o problema e os métodos iterativos não garantem que o ponto de mínimo obtido seja global. A solução é procurar valores iniciais para as variáveis de maneira que o processo de busca de um ponto de mínimo inicie dentro da "região de atração" de um ponto de mínimo global.

O processo de otimização utilizado neste trabalho é um método iterativo do tipo "descida" (procura diminuir o valor do índice de desempenho a cada passo).

Vamos dividir o processo de otimização em duas etapas: otimização do ciclo e otimização simultânea de defasagens e tempos de verde.

##### 4.1. DETERMINAÇÃO DOS VALORES INICIAIS DO TEMPO DE VERDE EFETIVO E CICLO DE CADA SEMÁFORO

Para determinar os valores iniciais do ciclo e do verde

efetivo para cada semáforo, consideramos que o fluxo de veículos chegando a cada intersecção é constante e igual ao fluxo médio atravessando cada ramo em regime permanente.

#### 4.1.1. DETERMINAÇÃO DO CICLO MÍNIMO DE CADA SEMÁFORO

O ciclo mínimo de cada semáforo é função dos tempos perdidos pelos veículos em cada fase do semáforo, dos tempos de vermelho integral e do grau de ocupação máximo em cada fase do semáforo.

$$Y_M = \frac{F(M)}{FS(M)}, \quad (4.1)$$

onde

$Y_M$  - grau de ocupação do ramo M;

$F(M)$  - fluxo de veículos no ramo M;

$FS(M)$  - fluxo de saturação no ramo M.

O grau de ocupação máximo  $Y_J$  a ser adotado para a fase J de cada semáforo, é o máximo dentre os graus de ocupação das aproximações controladas por aquela fase.

$$C_{MIN} = \frac{STP}{1-Y_1-Y_2} \quad (4.2)$$

onde

$$STP = TCH + TSA + VI(1) + VI(2) \quad (4.3)$$

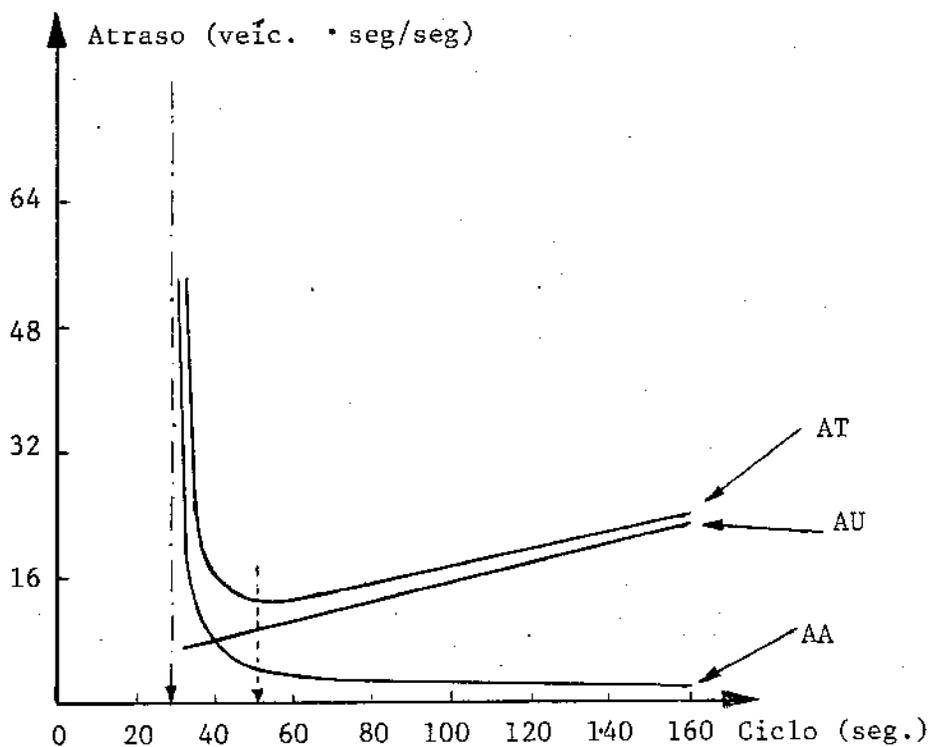
TCH - tempo perdido no fim do amarelo;

TSA - tempo perdido no início do verde;

VI(J) - tempo de vermelho integral da fase J (J=1,2).

#### 4.1.2. DETERMINAÇÃO DO CICLO FUNDAMENTAL DA REDE

A Figura 4.1 mostra a variação do atraso em função do ciclo para uma situação típica.



FONTE: Referência [11], vol. 1, pg. 24.

- AU - Atraso uniforme
- AA - Atraso aleatório
- AT - Atraso total
- Aponta o ciclo mínimo
- Aponta o valor ótimo de AT

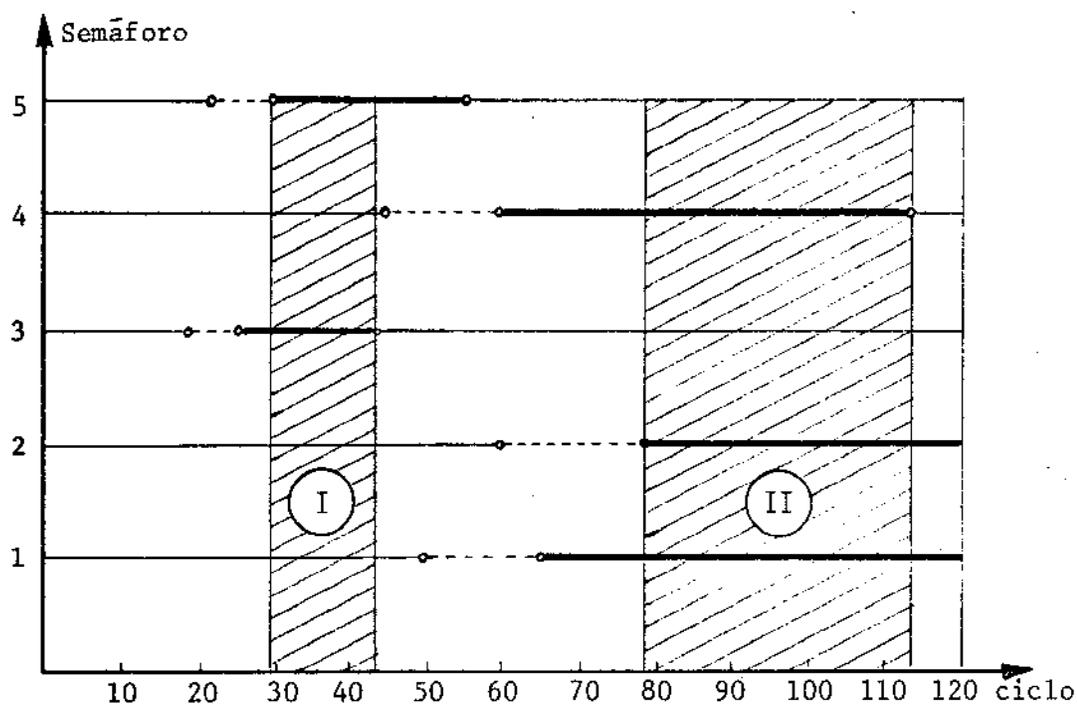
Figura 4.1 - Variação do atraso com o ciclo

Para se determinar um ciclo fundamental para a rede considera-se o fato de que dentro de uma faixa de variação do ciclo igual a

$$1.3 \cdot C_{\text{MIN}} \leq C \leq 2.5 \cdot C_{\text{MIN}} \quad (4.4)$$

o atraso não acusa variações superiores a 10% daquele correspondente ao dado pelo ciclo ótimo [11].

Da Figura 4.1 depreende-se que uma variação no ciclo acima do ponto  $2.5 \cdot C_{\text{MIN}}$  provoca um aumento no atraso sensivelmente menor que uma variação de mesma amplitude abaixo de  $1.3 \cdot C_{\text{MIN}}$ . Assim devemos ter mais cuidado com a restrição  $C \geq 1.3 \cdot C_{\text{MIN}}$  que com a restrição  $C \leq 2.5 \cdot C_{\text{MIN}}$ .



onde para cada semáforo I têm-se:

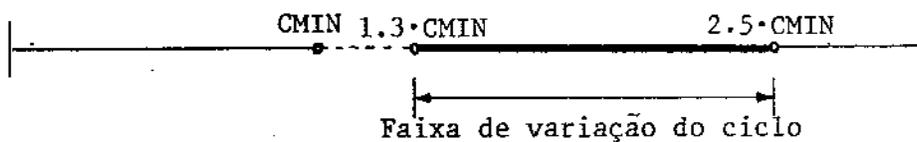


Figura 4.2 - Determinação do ciclo fundamental

Consideremos, por exemplo, uma rede com 5 cruzamentos cujos ciclos mínimos e faixas permissíveis de variação são dados pela Figura 4.2.

Dadas as faixas de variações toleráveis para o ciclo de cada um dos semáforos ( $1.3C_{\text{MIN}} \leq C \leq 2.5C_{\text{MIN}}$ ), depreende-se da Figura 4.2 que, ao se pretender adotar um ciclo fundamental para a rede, este deverá se encontrar dentro da região hachurada (II). No exemplo da Figura 4.2 o ciclo escolhido seria de, no mínimo, 78 segundos (na prática, 80 segundos).

Deve-se considerar, ainda, a possibilidade de um cruzamento muito mais carregado que os outros, pois seu ciclo mínimo pode ser maior que o valor máximo das faixas de variação de alguns dos demais. Neste caso prefere-se adotar um ciclo comum maior que o máximo das faixas de variação de alguns semáforos, mas nunca menor que o mínimo de uma delas pois uma variação no ciclo abaixo de  $1.3 \cdot C_{\text{MIN}}$  provoca um aumento no atraso muito maior que aquele observado quando se tem a mesma variação acima de  $2.5 \cdot C_{\text{MIN}}$ .

Assim adotamos como valor inicial para o ciclo fundamental da rede o menor múltiplo de 10 maior ou igual ao valor mínimo da faixa de variação do maior dos ciclos mínimos, ou seja

$$C = \lceil \max_I \{1.3 \cdot C_{\text{MIN}}(I)\} \rceil,$$

onde

C - ciclo fundamental da rede;

$C_{\text{MIN}}(I)$  - ciclo mínimo do semáforo I;

[•] - representa "o menor múltiplo de 10 maior ou igual a".

Observações realizadas sobre o comportamento dos motoristas em uma intersecção sinalizada e dos veículos que utilizam indicaram a necessidade de que se estabeleçam valores limites para o tempo de ciclo. Um limite inferior, da ordem de 40 segundos, foi adotado apoiando-se no fato de que ciclos menores só seriam possíveis em cruzamentos tão pouco carregados a ponto de, talvez, exigirem estudos sobre a real necessidade de um semáforo em tais intersecções. Além disto, considerando-se um tempo perdido total em cada cruzamento da ordem de 10 segundos por ciclo, pouco restaria para repartir entre os verdes das 2 fases se o ciclo fosse menor que 40 segundos.

Baseando-se no desconforto e na impaciência que as longas esperas causam aos motoristas, adotou-se um limitante superior de 120 segundos para o ciclo de cada semáforo.

#### 4.1.3. DETERMINAÇÃO DO CICLO DE CADA SEMÁFORO -

##### O CRITÉRIO DE ESCOLHA DE C ou C/2

Redes de tráfego com muitos cruzamentos podem apresentar conjuntos nitidamente distintos de valores de ciclos comuns. No exemplo da Figura 4.2, ao se determinar o ciclo comum para aquela rede, ter-se-ia que desprezar a região hachurada (I) a fim de evitar a opção por um ciclo que esteja à esquerda do intervalo de variação. A observação de tais situações indica a necessidade de se trabalhar com ciclos múltiplos. Ainda na situação da Figura 4.2 seria razoável propor, por exemplo, que os cruzamentos 1, 2 e 4 operassem com um ciclo de 80 segundos

enquanto que os cruzamentos 3 e 5 teriam 40 segundos de ciclo.

Neste modelo optamos pela possibilidade de que cada semáforo opere com um ciclo igual ao ciclo fundamental da rede (C) ou metade deste valor (C/2):

$$C(I) = \begin{cases} C & \text{se } 1.3 \cdot C_{\text{MIN}}(I) \geq C/2, \\ C/2 & \text{se } 1.3 \cdot C_{\text{MIN}}(I) < C/2, \end{cases} \quad (4.5)$$

onde

C - ciclo fundamental da rede;

C(I) - ciclo do semáforo I;

$C_{\text{MIN}}(I)$  - ciclo mínimo do semáforo I.

#### 4.1.4. DETERMINAÇÃO DO VALOR INICIAL DO TEMPO DE VERDE EFETIVO DE CADA SEMÁFORO

Conhecendo-se o valor do ciclo (C) para cada semáforo, procede-se o cálculo do tempo de verde efetivo através das seguintes equações:

$$VE_1 + VE_2 + STP = C \quad (4.6)$$

$$\frac{VE_1}{VE_2} = \frac{Y_1}{Y_2} \quad (4.7)$$

Das equações (4.6) e (4.7) obtém-se:

$$VE_1 = \frac{C - STP}{1 + Y_2/Y_1} \quad (4.8)$$

onde

$VE_j$  - verde efetivo da fase j do semáforo;

$Y_j$  - grau de ocupação máximo da fase j do semáforo;

STP - soma dos tempos perdidos (no início do verde, no fim

do amarelo e vermelho integral).

Se ampliarmos o tempo de verde da fase 1 de um semáforo até ocupar todo o ciclo, minimizamos o atraso das aproximações controladas por esta fase, mas causamos um atraso infinito nas aproximações controladas pela fase 2. Para evitar tais situações estabelecemos limites para a variação do verde efetivo.

#### 4.1.5. DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE VERDE MÍNIMO E MÁXIMO PARA CADA SEMÁFORO

O tempo de verde mínimo da fase 1 de cada semáforo ( $V_{MIN}(I)$ ) é o produto do ciclo pelo grau de ocupação máximo da fase 1 daquele semáforo:

$$V_{MIN}(I) = C(I) \cdot Y_1(I), \quad (4.9)$$

onde

$C(I)$  - ciclo do semáforo I;

$Y_1(I)$  - grau de ocupação máximo da fase 1 do semáforo I.

O tempo de verde máximo da fase 1 de cada semáforo ( $V_{MAX}(I)$ ) é calculado tomando-se o complementar em relação a C do tempo de verde mínimo da fase 2 daquele semáforo:

$$V_{MAX}(I) = C(I) - STP_1 - Y_2 \cdot C(I), \quad (4.10)$$

onde  $STP_1$  indica o tempo de vermelho integral mais os tempos perdidos na fase 1.

#### 4.2. A INFLUÊNCIA DA FILA DE VEÍCULOS NOS VALORES INICIAIS DE VE E C

Nas secções anteriores deste capítulo determinamos valo-

res iniciais para o ciclo e o verde efetivo de cada semáforo. Para tanto nos utilizamos unicamente do grau de ocupação de cada ramo e dos tempos perdidos em cada intersecção.

#### 4.2.1. A INFLUÊNCIA DA FILA DE VEÍCULOS

##### NO VALOR INICIAL DO CICLO

De posse dos valores iniciais de  $C$  e  $VE$  calculados nas secções anteriores, passamos a determinar o valor máximo para a fila de veículos em cada ramo, obtido através do produto do fluxo médio de veículos em cada ramo pelo tempo total de indicação de vermelho da fase do semáforo que controla aquele ramo.

O passo seguinte consiste em calcular, para cada ramo  $M$ , o valor de  $DVE(M)$  (expressão (3.18)) e, através dele, determinar o grau de saturação modificado  $X_{MOD}(M)$  (expressão (3.20)).

Determinamos entre os ramos controlados por cada fase de cada semáforo aquele que apresenta maior grau de saturação modificado e o denominamos "ramo preponderante" daquela fase daquele semáforo.

Nesta situação queremos responder a seguinte pergunta: o ciclo de cada semáforo consegue "acomodar" os tempos perdidos pelos veículos nos seus ramos preponderantes devido às filas de veículos nos ramos posteriores? Para tal calculamos, para cada semáforo, um novo valor para o ciclo mínimo (ciclo mínimo modificado) que é o ciclo mínimo original do semáforo acrescido dos valores de  $DVE$  dos seus ramos preponderantes:

$$DC_{MIN}(I) = C_{MIN}(I) - DVE_1(I) - DVE_2(I), \quad (4.11)$$

onde:

$DC_{MIN}(I)$  - ciclo mínimo modificado do semáforo I;

$C_{MIN}(I)$  - ciclo mínimo do semáforo I;

$DVE_j(I)$  - DVE do ramo preponderante da fase j do semáforo I.

Aplica-se ao valor do ciclo mínimo modificado de cada semáforo uma margem de segurança de 20% e compara-se com o seu ciclo individual. Temos, então, três situações possíveis:

i) O ciclo de cada semáforo é grande o suficiente para "acomodar" o seu ciclo mínimo modificado, isto é,

$$1.2 \cdot DC_{MIN}(I) < C(I) \quad (\forall I=1, \dots, IM).$$

Neste caso o ciclo fundamental da rede não se altera e a divisão dos ciclos individuais em C e C/2 permanece a mesma. Procede-se então uma nova repartição do ciclo em tempos de verde.

ii) O ciclo mínimo modificado de algum semáforo é maior que o seu ciclo individual, mas este é da forma C/2, isto é,

$$1.2 \cdot DC_{MIN}(I) > C(I) = C/2, \text{ para algum } I.$$

Neste caso tenta-se alterar o ciclo individual do semáforo de C/2 para C. Procede-se então uma nova repartição do ciclo em tempos de verde.

iii) O ciclo mínimo modificado de algum semáforo é maior que o ciclo fundamental da rede, isto é,

$$1.2 \cdot DC_{MIN}(I) > C, \text{ para algum } I.$$

Neste caso necessitamos determinar um novo ciclo fun-

damental para a rede e o fazemos através do mesmo procedimento utilizado na secção 4.1.2, considerando, agora, o ciclomínimo modificado de cada semáforo. Procede-se então uma nova divisão do ciclo de cada semáforo em C ou C/2.

#### 4.2.2. DETERMINAÇÃO DO VERDE EFETIVO INICIAL

##### CONSIDERANDO-SE A INFLUÊNCIA DAS FILAS DE VEÍCULOS

Na secção anterior obtivemos um novo valor para o ciclo individual de cada semáforo, valor este que considera, para cada ramo, a influência causada pelo crescimento da fila de veículos nos ramos posteriores. De posse deste novo ciclo individual vamos recalcular a sua repartição em tempos de verde, considerando-se agora o verde efetivo modificado de cada fase de cada semáforo.

Das equações:

$$VE_1 + VE_2 + STP = C$$

$$\frac{VE_{MOD1}}{VE_{MOD2}} = \frac{Y_1}{Y_2} \quad (4.12)$$

obtem-se:

$$VE_1 = \frac{Y_1 \cdot (C - STP + DVE_2) - Y_2 \cdot DVE_1}{Y_1 + Y_2} \quad (4.13)$$

onde

$$VE_{MOD1} = VE_1 + DVE_1$$

$$VE_{MOD2} = VE_2 + DVE_2$$

$VE_{MODJ}$  - verde efetivo modificado da fase J do semáforo  
( $JE\{1,2\}$ );

$DVE_J$  - DVE do ramo preponderante da fase J do semáforo  
( $JE\{1,2\}$ );

$Y_J$  - grau de ocupação do ramo preponderante da fase J;

STP - soma dos tempos perdidos (no início do verde no fim  
do amarelo e vermelho integral);

$VE_J$  - verde efetivo da fase J do semáforo;

C - ciclo individual do semáforo.

#### 4.2.3. CRITÉRIO DE PARADA PARA O PROCESSO DE INICIALIZAÇÃO

O processo que determina os valores iniciais para o ciclo fundamental da rede, ciclo individual e tempo de verde efetivo de cada semáforo é encerrado quando a fila de veículos em cada ramo da rede não ultrapassa o seu limite de fila ( $DVE(M) = 0$  para todo ramo M da rede), ou quando a fila de veículos em algum ramo ultrapassa o seu limite de fila mas sua influência nos tempos perdidos pelos veículos em intersecções anteriores é suficientemente pequena a ponto de não alterar o tempo de verde efetivo da fase do semáforo que controla estes veículos.

Assim o processo de inicialização pára quando: ou

i)  $DVE(M) = 0$  para todo ramo M, ou

ii)  $DVE(M) \neq 0$  para algum ramo M,

mas o tempo de verde efetivo de cada semáforo não é mais alterado pelo processo de inicialização, isto é, o conjunto de verdes efetivos permanece constante em duas iterações consecutivas do processo de inicialização.

#### 4.3. DETERMINAÇÃO DOS VALORES INICIAIS

##### DAS DEFASAGENS

Para a inicialização dos valores das defasagens entre semáforos não apresentamos nenhum critério sistemático. Tais valores são obtidos ao acaso.

#### 4.4. OTIMIZAÇÃO DE DEFASAGENS

##### E TEMPOS DE VERDE

Tendo obtido valores iniciais para ciclo, defasagens e tempos de verde efetivo de cada semáforo, passamos a tratar da otimização simultânea das defasagens e dos tempos de verde. Vamos utilizar um método de busca de mínimo do tipo "descida" proposto por Robertson em [15].

O primeiro passo do algoritmo de otimização consiste em calcular o índice de desempenho para um conjunto inicial de defasagens e tempos de verde. O conjunto inicial dos tempos de verde deve ser viável, isto é deve satisfazer o tempo de verde mínimo exigido por cada fase de cada semáforo. O próximo passo consiste em variar a defasagem de um dos semáforos de um número pré-determinado de intervalos de tempo (como vimos na secção 3.2.1, o ciclo fundamental foi dividido em 50 intervalos iguais de tempo) e recalcular o índice de desempenho. Se houver diminuição no índice de desempenho então a defasagem é alterada novamente, na mesma direção e com o mesmo número de unidades de tempo, e assim, sucessivamente, até que um valor mínimo seja alcançado. Se a primeira alteração na defasagem resultar em um aumento no índice de desempenho, procedem-se variações na direção oposta com o mesmo número de uni-

dades de tempo.

Repete-se tal procedimento para todos os semáforos da rede.

O passo seguinte consiste em alterar o tempo de verde de um semáforo de um número pré-determinado de intervalos de tempo, da mesma forma que se procedeu com a defasagem, e repetir o procedimento para todos os semáforos da rede.

A defasagem absoluta de um semáforo (secção 2.2.4) depende da origem de tempo considerada. Como o índice de desempenho AT é tomada com a rede em regime periódico, independente do estado inicial da rede e, portanto, independente da origem de tempo considerada, esta pode ser escolhida de modo a fixar o valor da defasagem absoluta de um semáforo em zero. Desta forma o número de semáforos com defasagem a ser otimizada diminui de um.

A fim de minimizar a possibilidade de se encontrar um mínimo local, adota-se a utilização de alterações pequenas e grandes no processo de otimização, objetivando a obtenção de um bom valor para o índice de desempenho, próximo ao mínimo global e com um esforço computacional viável.

Com o objetivo de afastar ainda mais a possibilidade de obtenção de um mínimo local, devemos dedicar particular atenção nas estimativas do conjunto inicial de tempos de verde, fazendo com que o processo de otimização inicie, se possível, em uma vizinhança do ponto de mínimo global. Esta "particular atenção" na determinação dos valores iniciais dos tempos de verde não deve, no entanto, ser levada a extremos pois devemos sempre ter em mente o fato de que os parâmetros utilizados no modelo (fluxos, tempos de percurso e etc.) são de grande variância pois se referem a fenômenos físicos sujeitos a variações aleatórias de grande amplitude.

#### 4.4.1. O NÚMERO DE ITERAÇÕES E O COMPRIMENTO DO PASSO

Considerando que o gráfico do atraso total médio dos veículos junto aos semáforos, como função dos tempos de verde e das defasagens, é uma superfície bastante irregular e, certamente, não convexa, Robertson [15] propôs para o processo de otimização, uma seqüência de oito passagens onde são variados alternadamente as defasagens e os tempos de verde efetivo de cada semáforo, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Passagens do processo de otimização

Passagem	Comprimento do passo (DT = 1/50C)	Variável a ser otimizada
1	7	Defasagens
2	20	Defasagens
3	1	Verdes
4	7	Defasagens
5	20	Defasagens
6	1	Defasagens
7	1	Verdes
8	1	Defasagens

FONTE: Referência [15], pg. 9.

Para aqueles semáforos cujo ciclo individual é  $C/2$  (metade do ciclo fundamental da rede) devemos dividir por dois os comprimentos dos passos da Tabela 4.1.

#### 4.5. OTIMIZAÇÃO DO CICLO

Findo o processo de otimização dos tempos de verde e defasagens, realiza-se uma pequena busca sobre novos valores pa-

ra o ciclo fundamental da rede. Tal procedimento consiste em dar incrementos de dez (10) unidades de tempo ao valor do ciclo fundamental (que é sempre um múltiplo positivo de dez (10)) e repetir os procedimentos de inicialização e otimização. Os incrementos são dados somente no sentido de aumentar o valor do ciclo, pois o mesmo foi inicializado no seu valor mínimo e um decréscimo levaria à saturação da rede. Além disto é respeitado um limite máximo de 120 segundos para o ciclo.

Este processo de busca de novos valores para o ciclo fundamental da rede não foi profundamente explorado neste trabalho.

## 5. RESULTADOS NUMÉRICOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentamos alguns resultados obtidos da aplicação dos modelos descritos nos Capítulos 3 e 4 em duas redes de tráfego cujos parâmetros são compatíveis com aqueles encontrados na prática.

### 5.1. REDE Nº 1

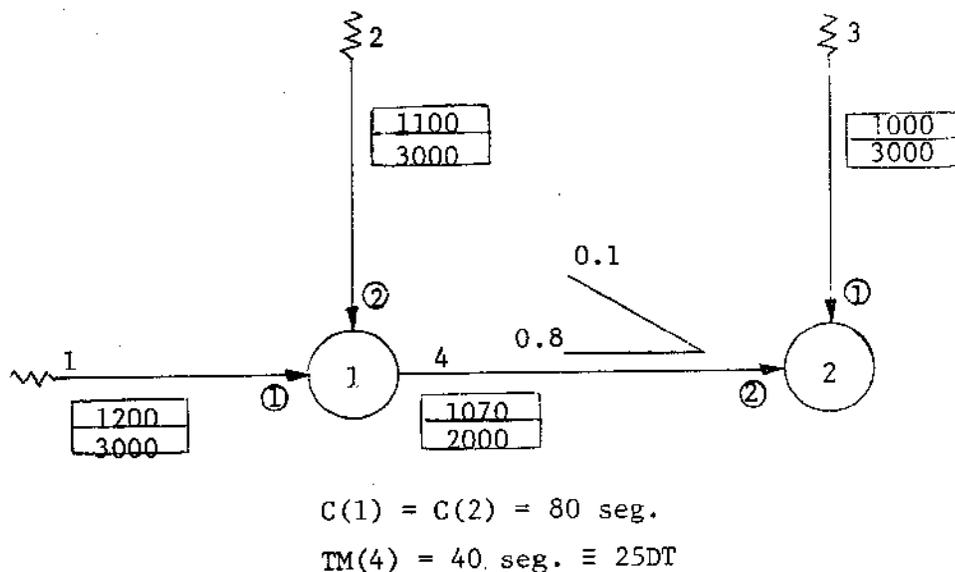


Figura 5.1 - Rede nº 1

As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 representam, respectivamente, as variações de verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 1, de fase relativa entre os semáforos 2 e 1 e atrasos na rede nº 1, todos como função do limite de fila imposto ao ramo 4. De-las podemos extrair algumas conclusões, que seguem.

A medida que diminuimos o limite de fila no ramo 4, a tendência do processo de inicialização dos tempos de verde é aumentar o verde efetivo do semáforo 1 (fase 1) compensando assim o acréscimo nos tempos perdidos pelos veículos que deixam o ramo 1, causado pelo crescimento da fila de veículos a partir da intersecção 2.

Desde a situação  $LF(4) = 10$  (onde não existe influência de filas sobre veículos deixando intersecções imediatamente anteriores e portanto corresponde a resultados obtidos pela aplicação do método TRANSYT) até a situação  $LF(4) = 5$  (inclusive) o processo de otimização não considera a influência da fila de veículos no ramo 4 sobre os veículos deixando a intersecção 1

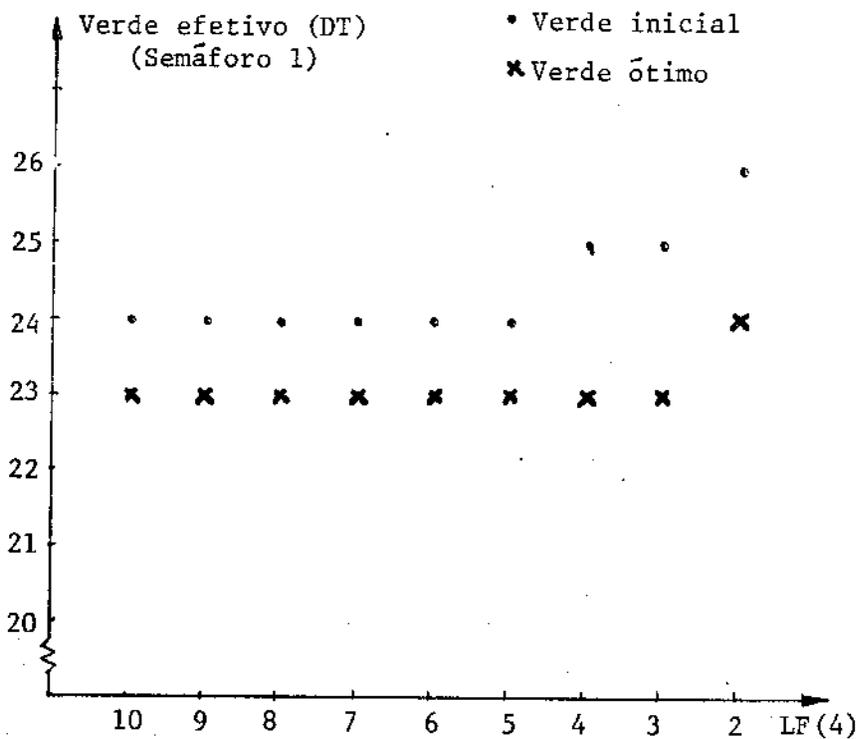


Figura 5.2 - Rede nº 1 - verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 1 em função do limite da fila no ramo 4.

(a fila máxima de veículos no ramo 4 durante um ciclo é de 8 unidades).

A partir da situação  $LF(4) = 4$  o processo de otimização passa a considerar a influência da fila de veículos no ramo 4 sobre os veículos que deixam os ramos 1 e 2. A primeira consequência é um aumento na defasagem relativa entre os semáforos 2 e 1 mantendo os tempos de verde, procurando assim diminuir a fila máxima "vista" pelos veículos que deixam o ramo 1, isto é, diminuir a fila máxima no ramo 4 no intervalo de tempo em que o semáforo 1 apresenta indicação de verde (situações

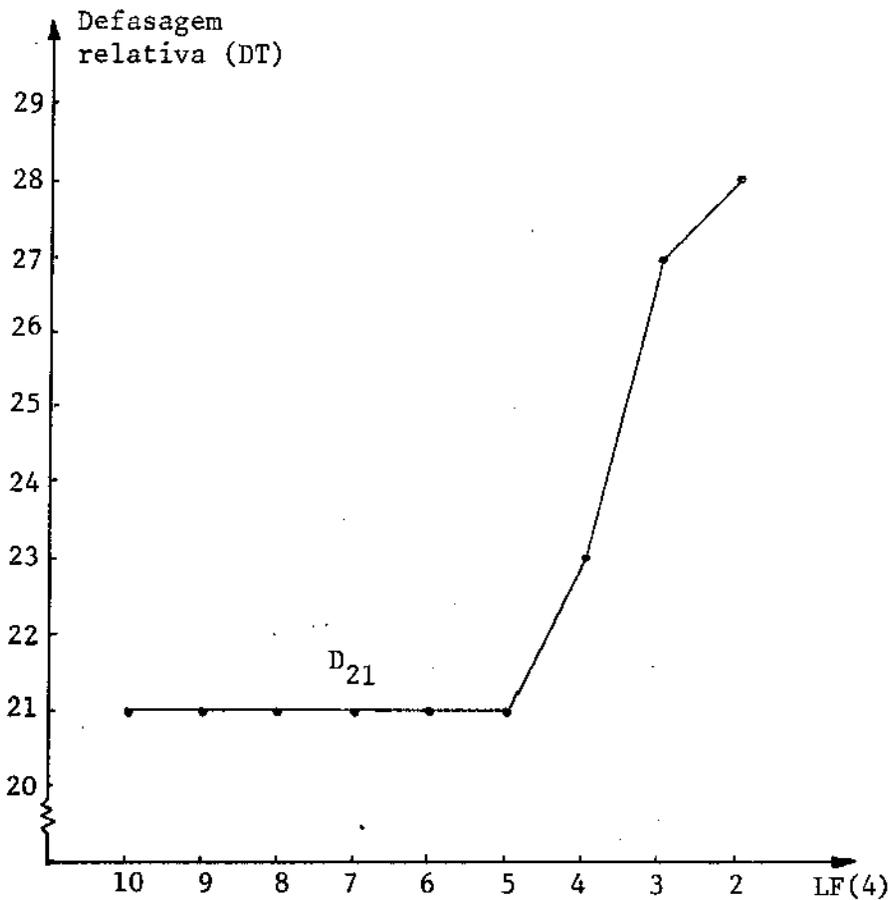


Figura 5.3 - Rede nº 1 - Defasagem relativa entre os semáforos 2 e 1 em função do limite de fila no ramo 4.

LF(4) = 4 e LF(4) = 3).

Na situação LF(4) = 2 este simples ajuste na defasagem mostra-se insuficiente para compensar o aumento nos tempos perdidos pelos veículos que deixam o ramo 1 e assim há um aumen-

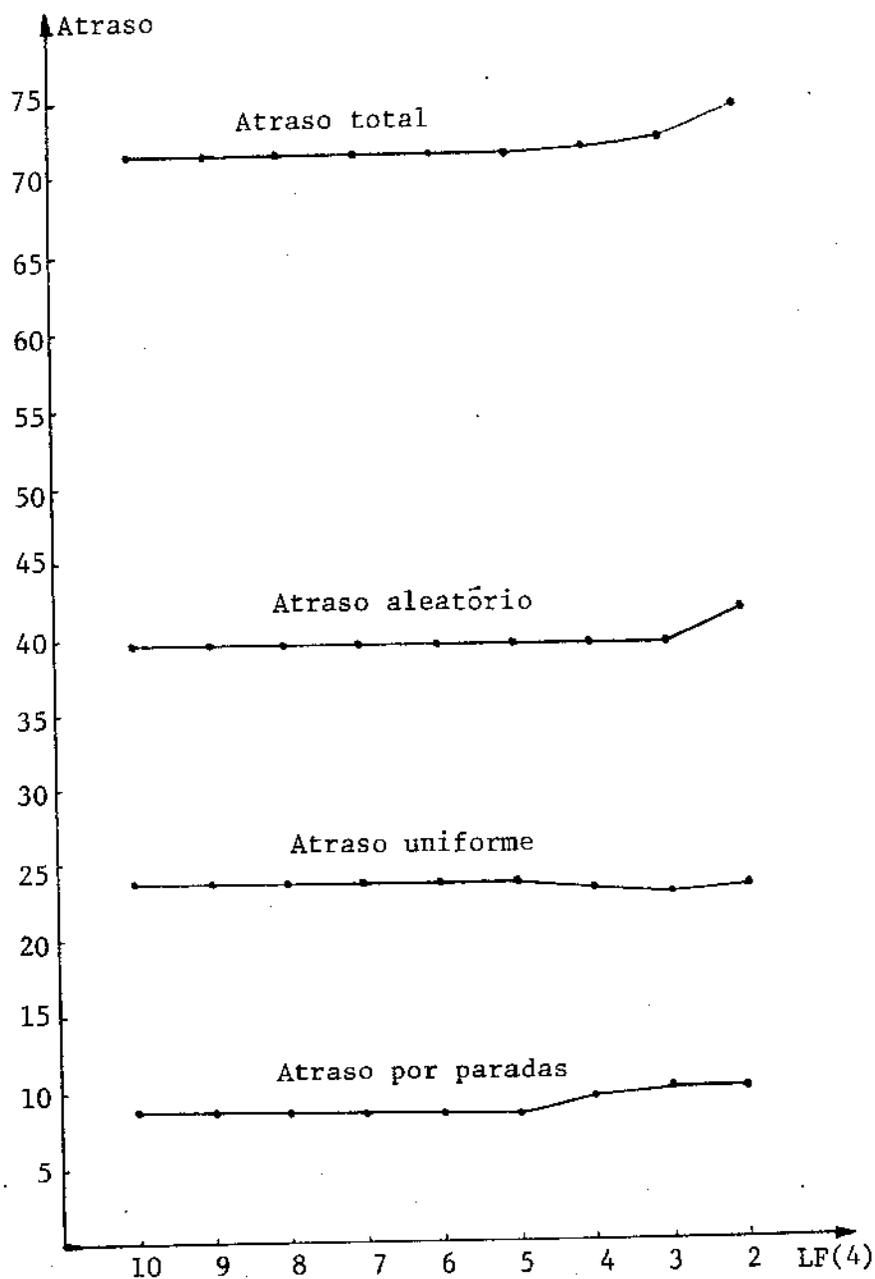


Figura 5.4 - Rede nº 1 - Atrasos em função do limite de fila no ramo 4.

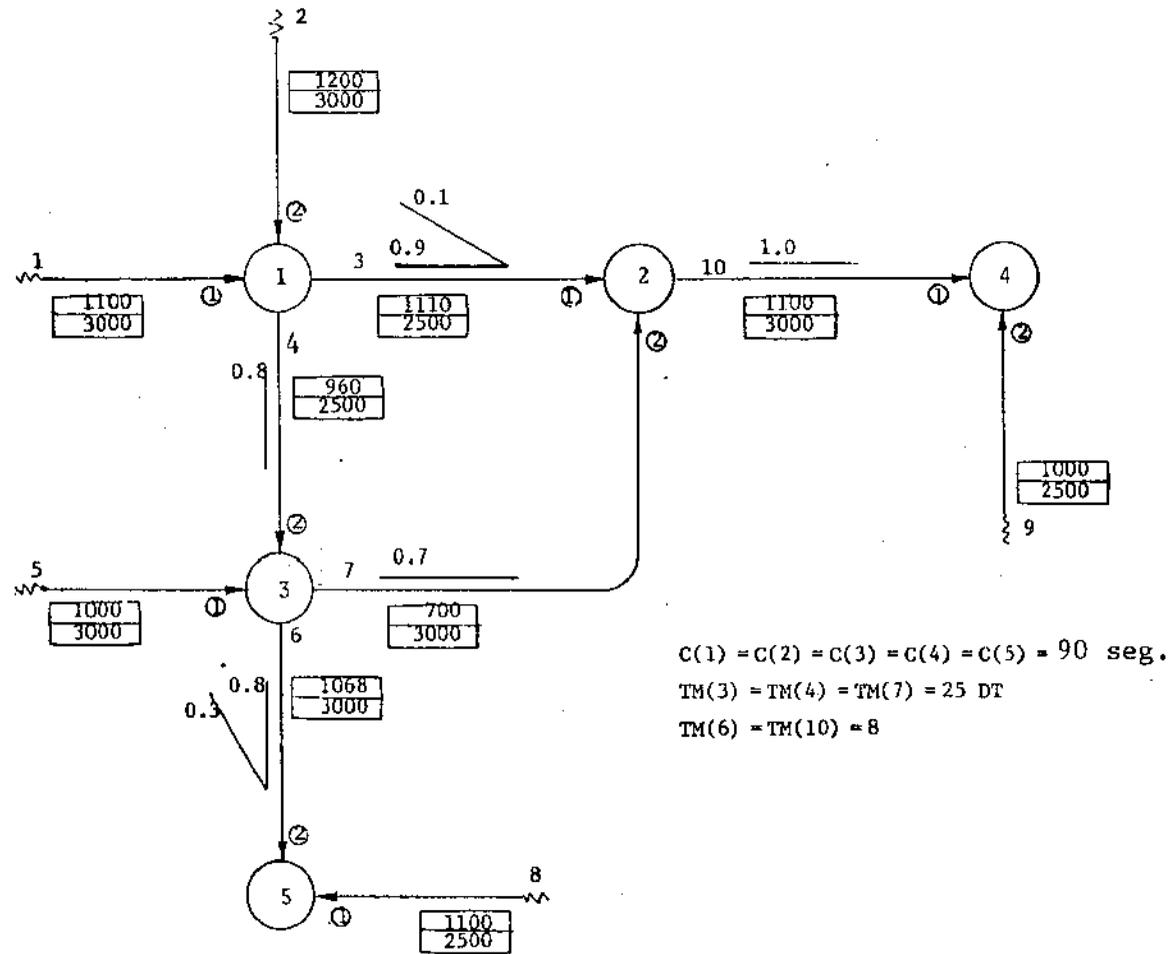


Figura 5.5 - Rede nº 2

to no verde efetivo do semáforo 1.

Na Tabela 5.1, que nos fornece a fila máxima no ramo 4 durante um ciclo como função do limite de fila no ramo 4, verificamos que o processo de otimização tende também a diminuir o comprimento de fila no ramo 4.

Tabela 5.1 - Fila máxima no ramo 4 durante um ciclo em relação ao limite de fila no ramo 4

Limite de fila no ramo 4	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Fila máxima no ramo 4 durante um ciclo	8	8	8	8	8	8	7	6	6

## 5.2. REDE Nº 2

Vamos analisar o comportamento do método aplicando-o à rede nº 2 e variando conjuntamente e em separado os limites de fila nos ramos 6 e 10.

### 5.2.1. RESULTADOS OBTIDOS COM A REDE Nº 2 VARIANDO-SE O LIMITE DE FILA SOMENTE NO RAMO 6

Passamos a analisar as Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 que representam, respectivamente, as variações de verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 3, as defasagens relativas e os atrasos na rede número 2, todos como função do limite de fila no ramo 6 (LF(6)).

Os resultados na situação LF(6) = 10 correspondem a aplicação do método TRANSYT à rede número 2. A medida que vamos diminuindo o limite tolerável para a fila no ramo 6, percebemos uma diminuição no verde efetivo do semáforo 3. Esta diminuição corresponde a um aumento no tempo de verde disponível

aos veículos que deixam o ramo 4, que é o responsável principal pelo fluxo fornecido ao ramo 6.

Assim a diminuição do verde efetivo do semáforo 3 tende a compensar o acréscimo nos tempos perdidos pelos veículos que deixam o ramo 4 causado pelo crescimento da fila a partir da intersecção 5.

A diminuição da defasagem relativa entre os semáforos 5 e 3 tende a "esconder" a fila no ramo 6 dos veículos que deixam o ramo 4.

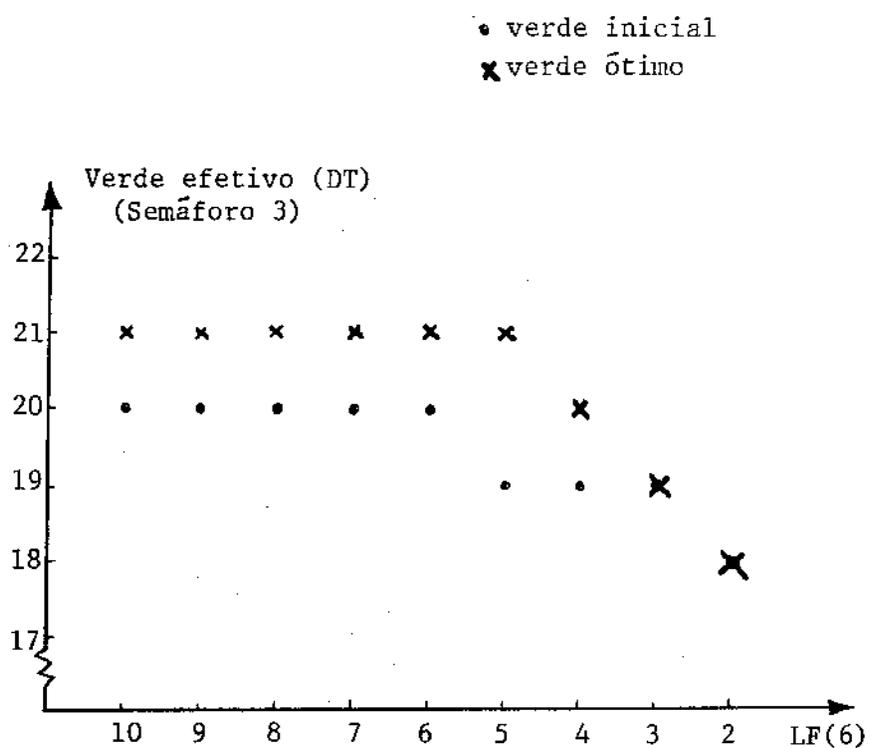


Figura 5.6 - Rede nº 2 - Verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 3 em função do limite da fila no ramo 6.

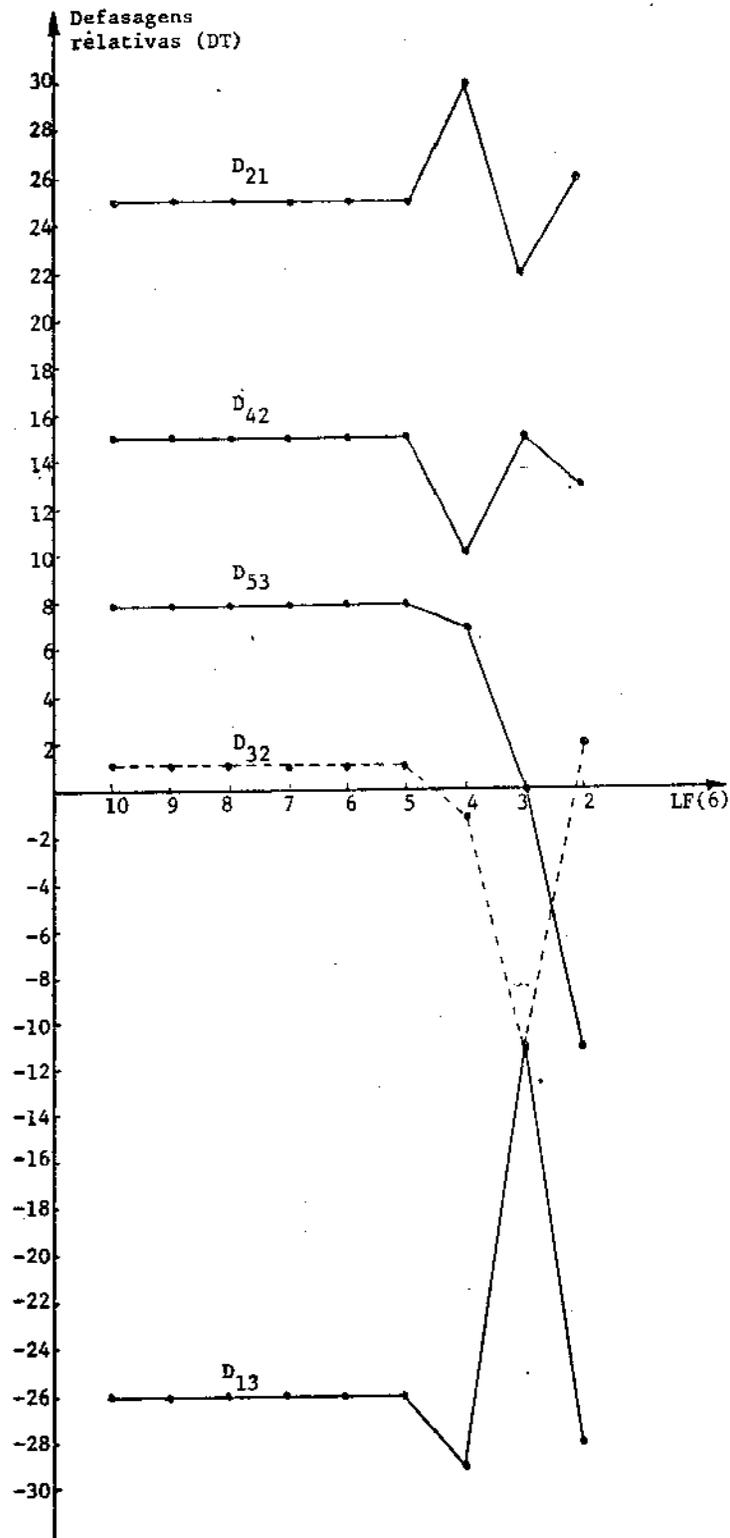


Figura 5.7 - Rede nº 2 - Defasagens relativas em função do limite de fila no ramo 6

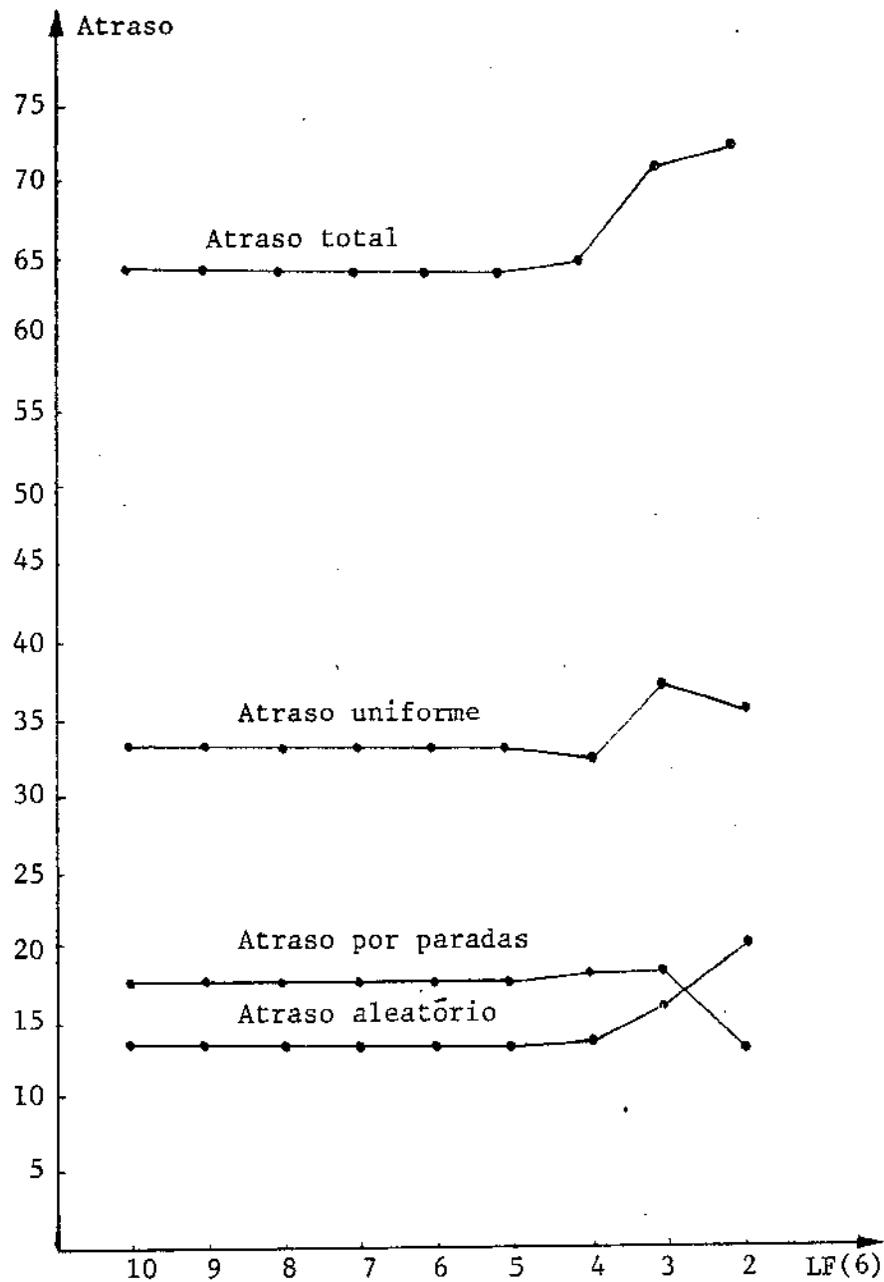


Figura 5.8 - Rede nº 2 - Atrasos em função do limite da fila no ramo 6.

5.2.2. RESULTADOS OBTIDOS COM A REDE Nº 2 VARIANDO-SE OS LIMITES DE FILA SOMENTE NO RAMO 10

As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 representam, respectivamente, as variações de verde efetivo (inicial e ótimo) dos

semáforos 2 e 4, as defasagens relativas e os atrasos na rede nº 2, todos como função do limite de fila no ramo 10.

O processo de inicialização dos tempos de verde efetivo tende a aumentar o verde inicial do semáforo 2 a medida que diminuimos o limite de fila no ramo 10 visando compensar o aumento nos tempos perdidos pelos veículos que deixam a intersecção 2.

Até a situação  $LF(10) = 4$  a fila de veículos no ramo 10

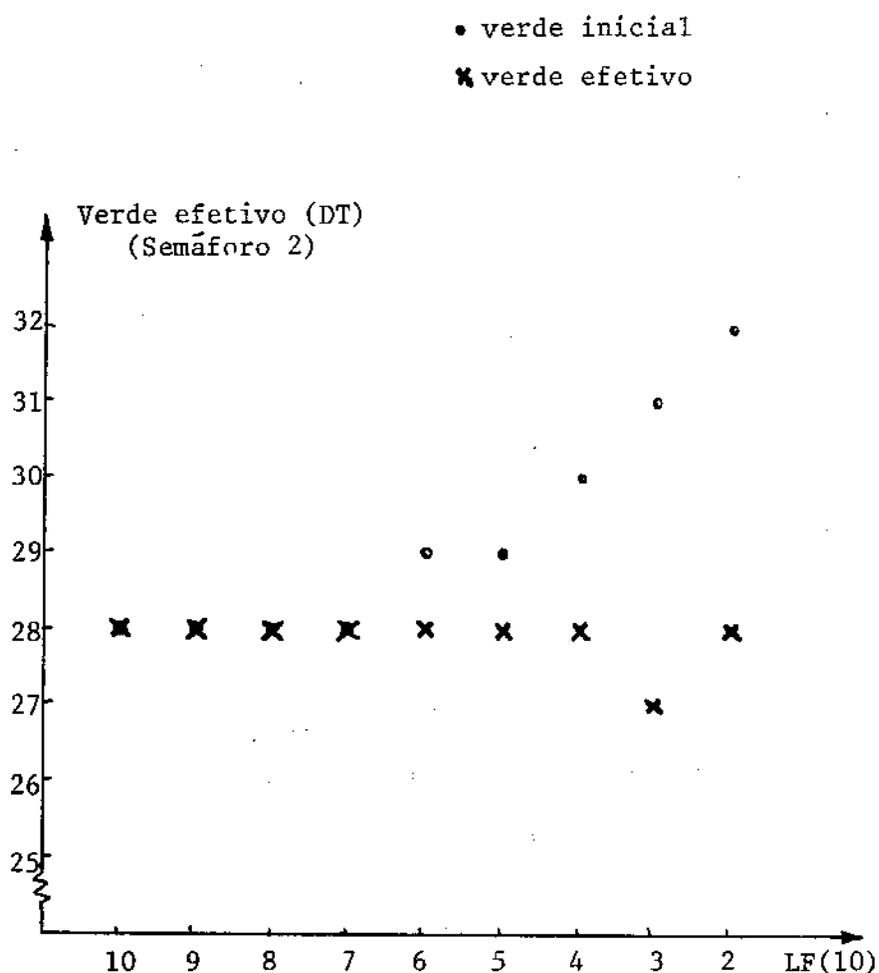


Figura 5.9 - Rede nº 2 - Verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 2 em função do limite da fila no ramo 10.

não interfere no processo de otimização. Na situação  $LF(10) = 3$  nota-se uma mudança de compromisso na malha formada pelos ramos 3, 4 e 7, passando a privilegiar o fluxo de veículos no ramo 7 em detrimento do fluxo no ramo 3. Essa mudança de compromisso é percebida através de uma diminuição no verde efetivo do semáforo 2 (e, conseqüentemente, um aumento no verde efetivo disponível aos veículos que deixam o ramo 7) e uma alteração nas defasagens relativas entre os semáforos que compõem aquela malha.

Na situação  $LF(10) = 2$  há um crescimento no verde efetivo do semáforo 4 causando uma diminuição na fila formada no ramo 10. A diminuição desta fila acarreta na malha formada pelos ramos 3, 4 e 7 um retorno a situações anteriores ( $LF(10) \geq 4$ ), privilegiando novamente o fluxo de veículos no ramo 3 em de-

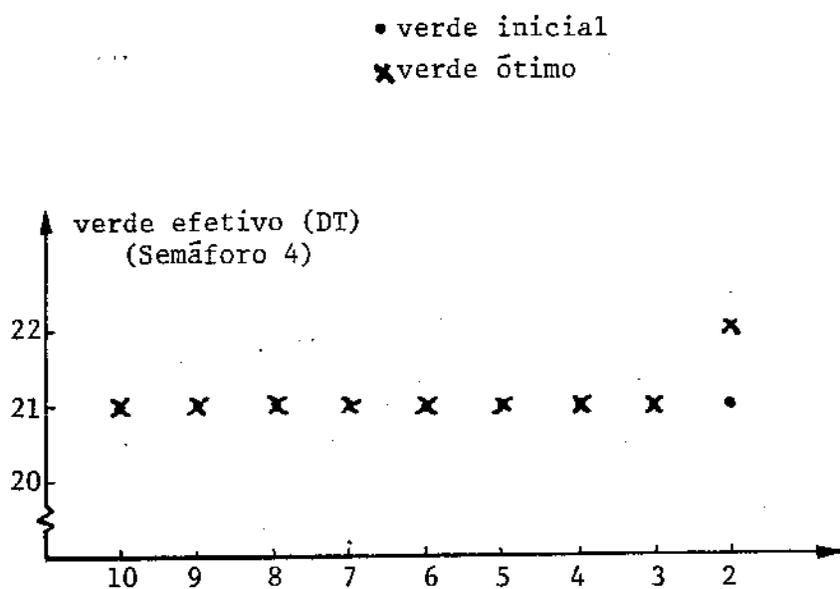


Figura 5.10 - Rede nº 2 - Verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 4 em função do limite de fila no ramo 10.

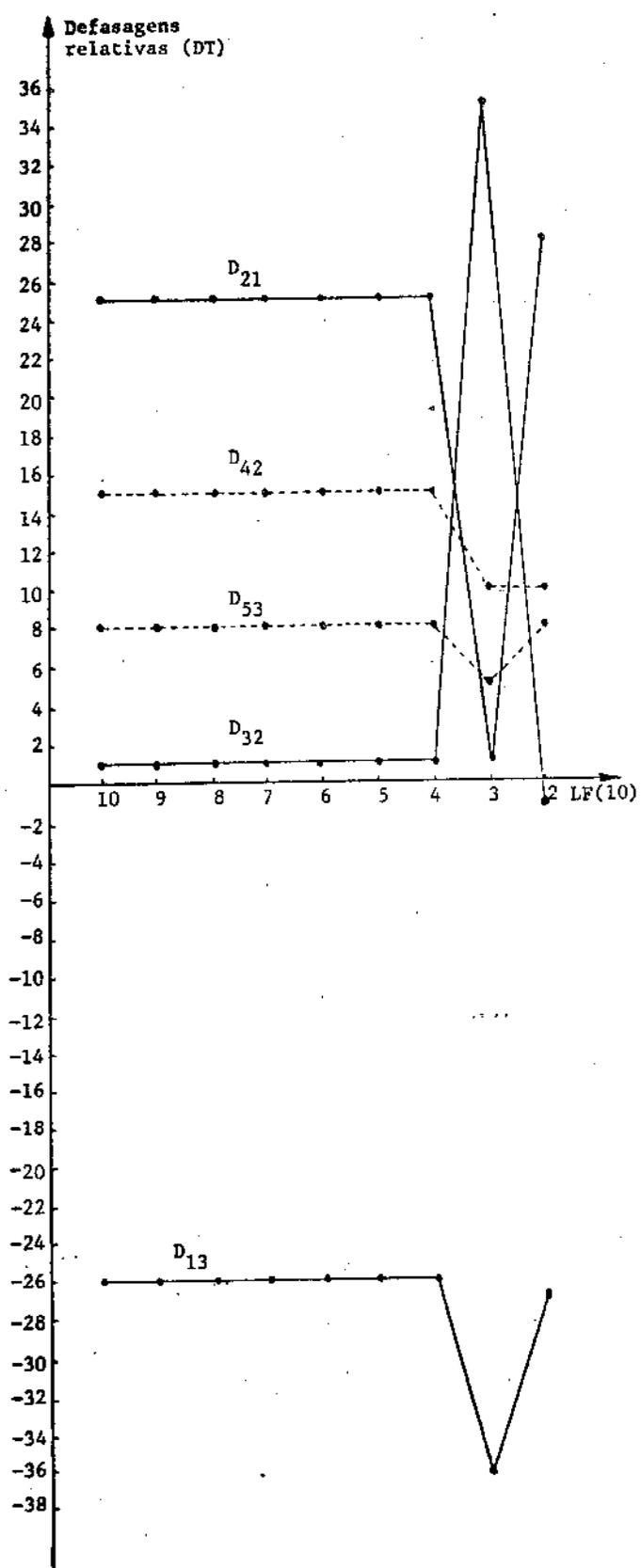


Figura 5.11 - Rede nº 2 - Defasagens relativas em função do limite de fila no ramo 10

trimento do fluxo no ramo 7.

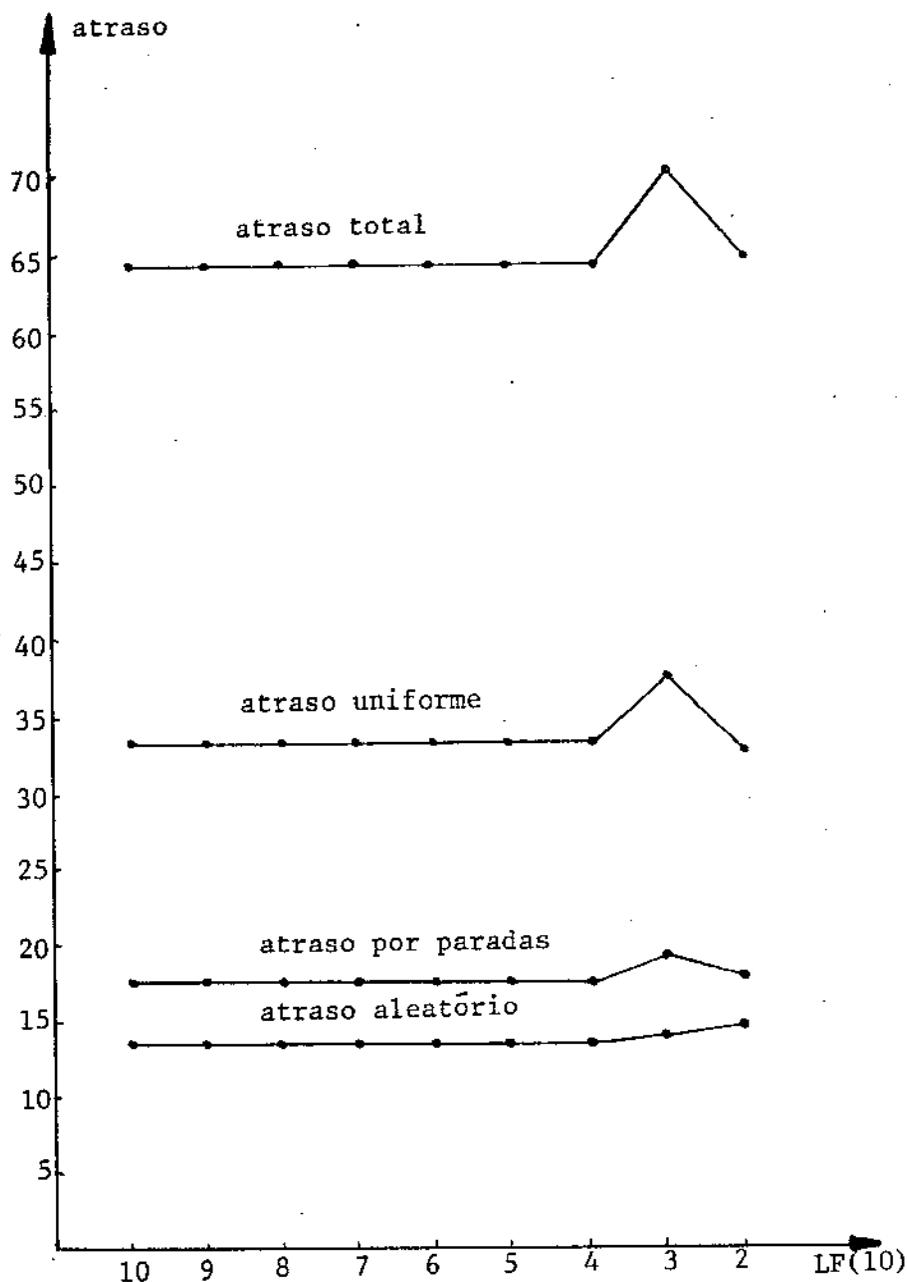


Figura 5.12 - Rede nº 2 - Atrasos em função do limite de fila no ramo 10.

5.2.3. RESULTADOS OBTIDOS COM A REDE Nº 2 VARIANDO-SE CONJUNTAMENTE OS LIMITES DE FILA NOS RAMOS 6 E 10

Analisando as Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17, que

representam, respectivamente, as variações de verde efetivo (inicial e ótimo) dos semáforos 2, 3 e 4, as defasagens relativas e os atrasos dos veículos na rede nº2, todos como função dos limites de fila nos ramos 6 e 10 (que variam conjuntamente), notamos que elas praticamente agrupam os fenômenos observados nas secções 5.2.1 e 5.2.2. Assim, uma diminuição dos li-

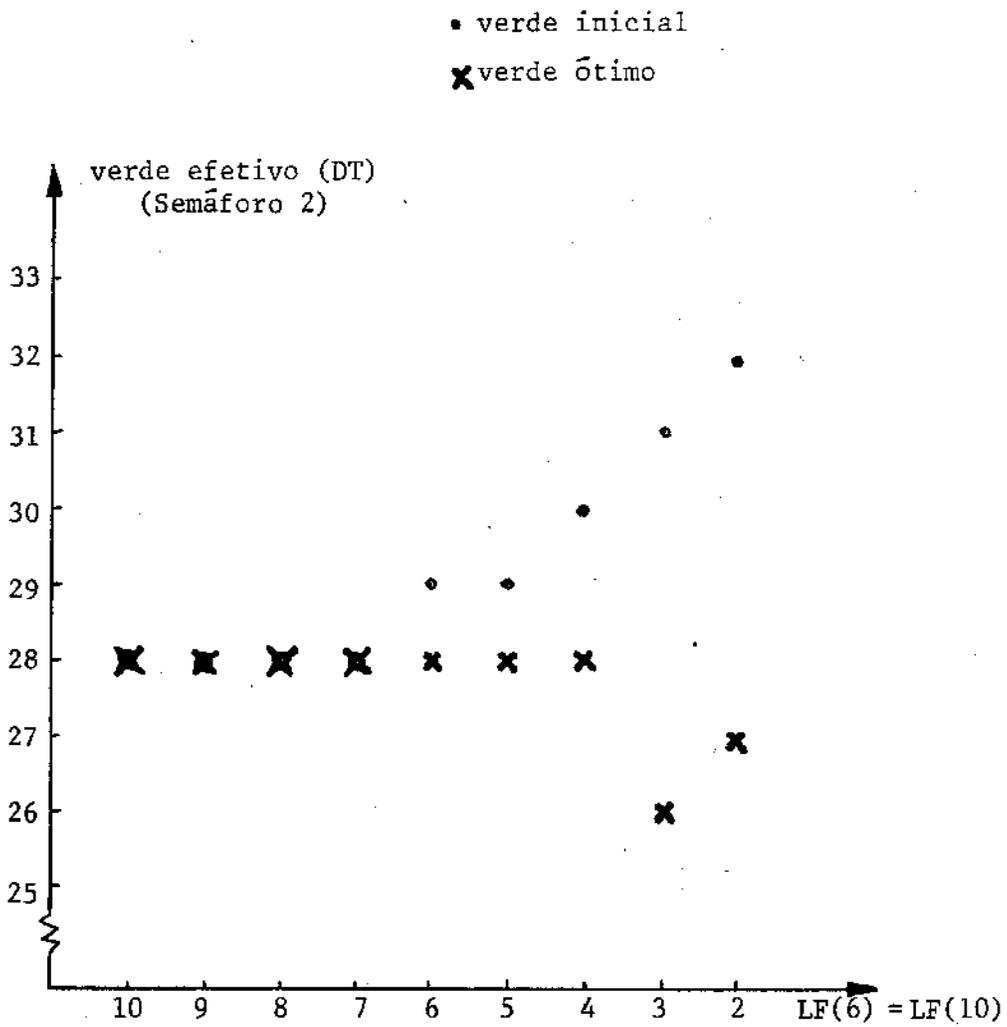


Figura 5.13 - Rede nº 2 - Verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 2 em função dos limites de fila nos ramos 6 e 10

mites de fila naqueles ramos acarreta uma diminuição do verde efetivo do semáforo 3 (aumentando, conseqüentemente, o tempo de verde disponível aos veículos que deixam o ramo 4) bem como uma mudança de compromisso em relação a malha formada pelos ramos 3, 4 e 7, privilegiando ora o fluxo de veículos deixando o ramo 3, ora o fluxo de veículos deixando o ramo 7.

5791/BC

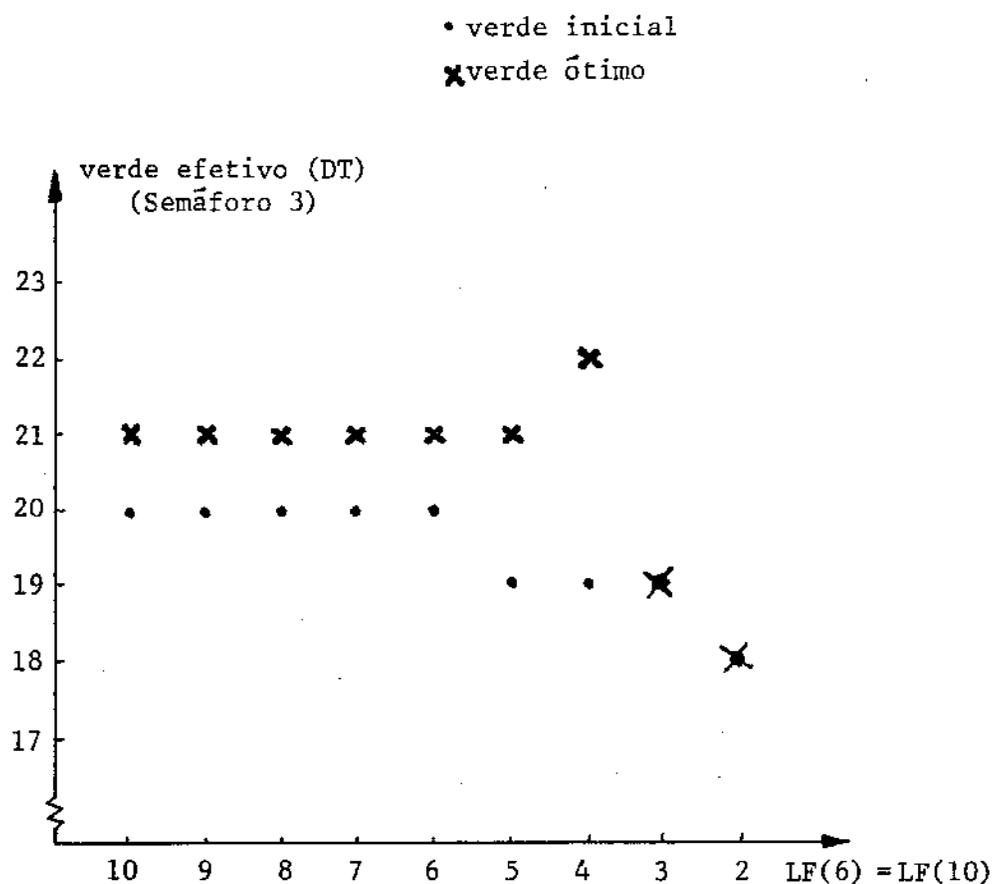


Figura 5.14 - Rede nº 2 - Verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 3 em função dos limites de fila nos ramos 6 e 10

• verde inicial  
x verde ótimo

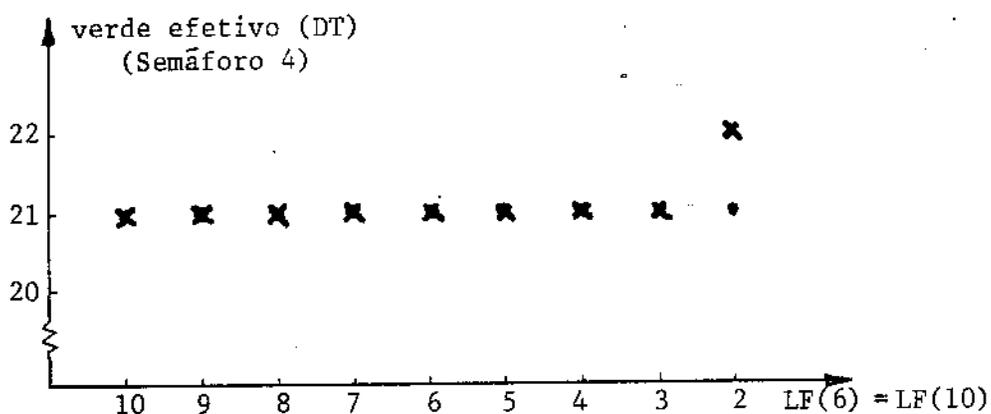


Figura 5.15 - Rede nº 2 - Verde efetivo (inicial e ótimo) do semáforo 4 em função dos limites de fila nos ramos 6 e 10.

### 5.3. O ESFORÇO COMPUTACIONAL

Os resultados numéricos descritos neste capítulo foram obtidos através de um programa para computadores digitais desenvolvido em linguagem FORTRAN.

Nos exemplos trabalhados utilizando o computador PDP10 da UNICAMP não foram observadas variações significativas do esforço computacional em função dos limites de fila. Assim, em relação ao método TRANSYT, a introdução de dispositivos que consideram a influência das filas de veículos sobre veículos deixando intersecções imediatamente anteriores, como descritos nesse trabalho, não acarreta variações sensíveis no esforço computacional.

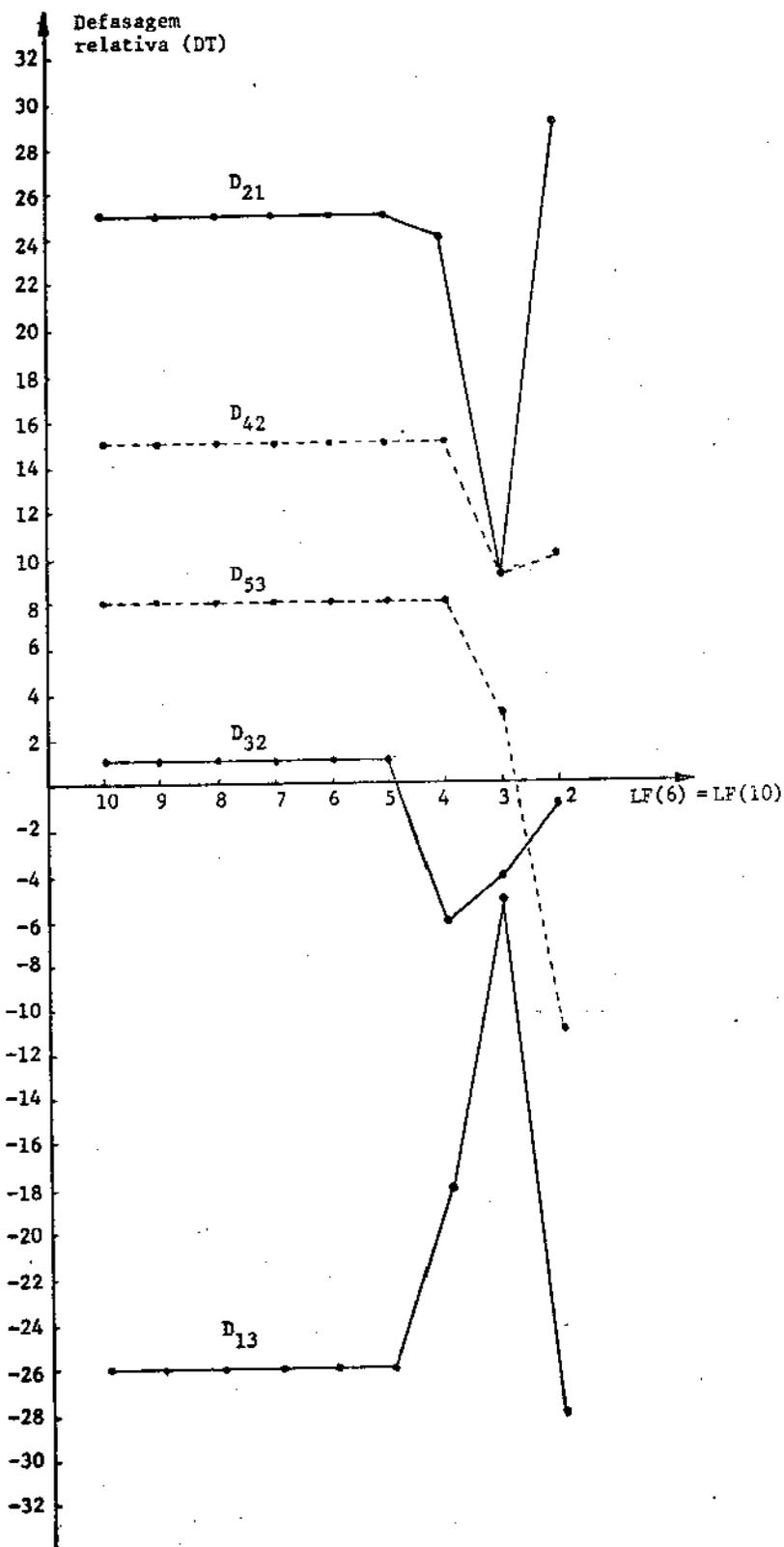


Figura 5.16 - Rede nº 2 - Defasagens relativas em função dos limites de fila nos ramos 6 e 10

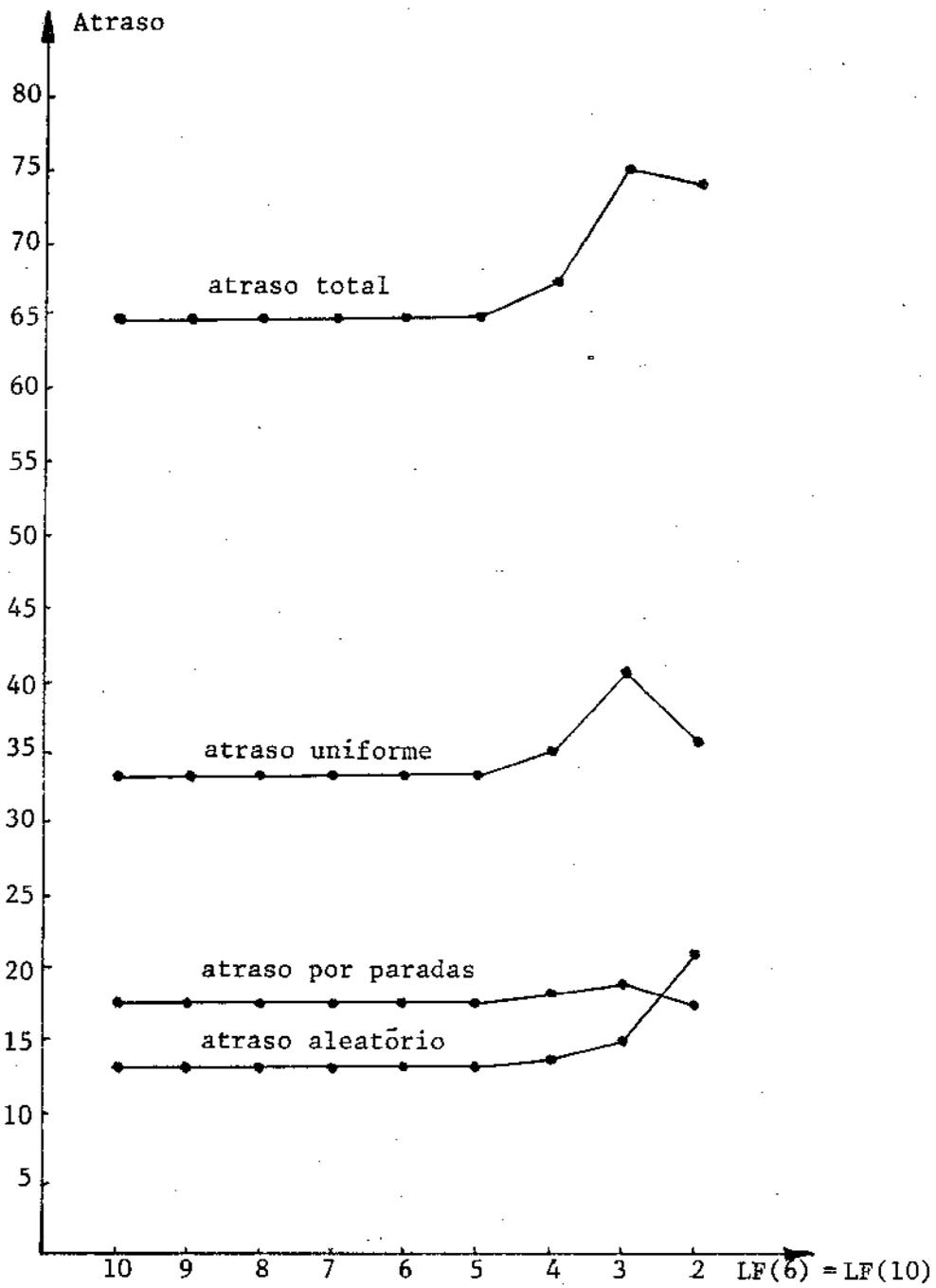


Figura 5.17 - Rede nº 2 - Atrasos em função dos limites de filas nos ramos 6 e 10.

#### 5.4. CONCLUSÃO FINAL

Neste trabalho tentamos introduzir em um modelo clássico

de redes de semáforos coordenados (o método TRANSYT) a influência das filas de veículos sobre os veículos que deixam intersecções imediatamente anteriores.

Os resultados apresentados correspondentes a limites de fila de 10 unidades são aqueles obtidos pela aplicação do método TRANSYT como apresentado em [15,11]. A medida que diminuimos os limites de fila percebemos que o processo de otimização utilizado nos leva a situações completamente distintas daquelas obtidas pela aplicação do método TRANSYT, confirmando a conjectura de que o crescimento desordenado das filas de veículos interfere sensivelmente no desempenho de uma rede de semáforos coordenados. Desta forma, ao aplicarmos o método TRANSYT a certas redes de tráfego, poderíamos obter políticas de semáforos que, por ignorar a influência das filas de veículos sobre os veículos deixando intersecções anteriores, levassem a situações degradadas de operação podendo chegar a um estado de congestionamento. Ao considerarmos o modelo descrito neste trabalho conseguiremos, sem provocar grandes alterações no índice de desempenho, novas políticas de semáforos mais adequadas ao tratamento do problema.

A influência das filas de veículos sobre veículos que deixam intersecções imediatamente anteriores foi quantificada na parcela do índice de desempenho aqui chamada de Atraso Aleatório. Assim as filas de veículos que ultrapassam os limites de fila em cada ramo atuam duplamente no índice de desempenho: no Atraso Uniforme e no Atraso Aleatório.

Neste contexto a otimização das defasagens assume papel importante, uma vez que estas se referem às filas que são "vis-

tas" pelos veículos (ou seja, filas que se desenvolvem a partir de certas intersecções no intervalo de tempo em que os semáforos de intersecções imediatamente anteriores apresentam indicação de verde), fazendo com que o processo de otimização tente "esconder" as filas que ultrapassam o respectivo limite de fila.

Apesar de havermos apresentado resultados numéricos para duas redes de tráfego pequenas, as situações nelas descritas são de ocorrência comum em redes de tráfego de maior porte. Os exemplos aqui apresentados podem ser considerados como sub-redes de alguma rede de tráfego maior e, ao otimizarmos esta rede maior, certamente iríamos perceber, localmente, as situações descritas neste trabalho.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] - AUTHIÉ, G. & LEGLISE, M., *Analyse Critique de la Conception et du Comportement de Cinq Modeles de Trafic*, Transportation Research, Vol. 7, 1973.
- [2] - BURIAN, Y. e outros, *Otimização de uma Rede de Tráfego - Método TRANSYT*, Publicação Interna FEC/UNICAMP 03/73, Campinas, 1973.
- [3] - FRANÇA, P.; FERNANDES, J.; SOARES, S. e ALBUQUERQUE, R., *Convênio Metrô/Unicamp*, PS 21156-1, Relatório Final, 1973.
- [4] - HOLROYD, J., HILLIER, J.A., *Area Traffic Control in Glasgow: A Summary of Results From Four Control Schemes*, Traffic Engineering and Control, September 1969.
- [5] - HUDDART, K.W., *Traffic Signal Progressions - G.L.C. Combination Method*, Traffic Engineering and Control, Vol. 11 nº 7, november 1969.
- [6] - HUNT, P.B. & KENNEDY, J.V., *A Guide to TRANSYT/7*, Road Research Laboratory, TRRL Supplementary Report 595, Crowthorne, Inglaterra, 1980.
- [7] - LITTLE, J.D.C., GARTNER, N. & GABBAY, H., *Optimization of Traffic Signal Settings in a Network by Mixed-Integer-Linear Programming*, presented at ORSATIMS Joint National Meeting, Boston, April 1974.
- [8] - MAC GOWAN, C.J. & LUM, H., *SIGOP or TRANSYT?*, Traffic Engineering, April 1975.
- [9] - MAY, A.D., *Some Fixed Time Signal Control Computer Programs*, Traffic Control and Transportation Systems, North Holland Co., 1974.
- [10] - MILANI, B.E.A., *Otimização da Política de Semáforos em Redes de Tráfego Não-Saturadas: Uma Contribuição ao seu Estudo e Realização em Computadores Híbridos*, Tese de Mestrado, Publicação Interna FEC/UNICAMP, 21/76, Campinas, 1976.
- [11] - MILANI, B.E.A. & ALBUQUERQUE, R., *Implementação ao Modelo CÔSE II*, (3 volumes), Publicação Interna FEC/UNICAMP 22/76, Campinas, 1976.
- [12] - PEAT, MARWICK, LIVINGSTONE & CO., *SIGOP: Traffic Signal Optimization Program - User's Manual*, Clearinghouse Report PB-182-835, U.S. Bureau of Public Roads, 1968.

- [13] - PIGNATARO, L.J., LEE, B. & CROWLEY, K.W., *Better Use at Signals Under Oversaturated Flows*, TRB NRC Special Report 153, USA, 1975.
- [14] - PIGNATARO, L.J., LEE, B. & CROWLEY, K.W., *Oversaturation Terms and Measurements Seem Adequate After Field Validation*, *Traffic Engineering*, Vol. 44, June 1974.
- [15] - ROBERTSON, D.I., *TRANSYT, A Traffic Network Study Tool*, Road Research Laboratory, TRRL Report LR253, Crowthorne, Inglaterra, 1969.
- [16] - *Traffic Control in Oversaturated Street Networks*, NCHRP 3-18(2), Final Report, Polytechnic Institute of New York, N.York, 1975.
- [17] - WEBSTER, F.W., *Traffic Signal Settings*, Road Research Technical Paper n° 39, London, 1958.
- [18] - WOHL AND MARTIN, *Traffic Systems Analysis for Engineers and Planners*, McGraw-Hill, 1967.